



APARTADO AEREO 67-13

CABLES: CINATROP

CALI - COLOMBIA

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL

TO:

SANCHEZ A PEDRO- SALINAS G JOSE

~~Tecnología~~ de bajos insumos para el
manejo de oxisoles y ultisoles en america
tropical.

S
599
.9
.T76
S2e

editec



SERVICIOS EN COMUNICACION E INFORMACION TECNICA

GRUPO PROFESIONAL MULTIDISCIPLINARIO

TRADUCCION Y EDICION

CIB
S.E.



~~TECNOLOGIA DE BAJOS INSUMOS~~

PARA EL MANEJO DE

OXISOLES Y ULTISOLES EN AMERICA TROPICAL


BIBLIOTECA

33102

Pedro A. Sánchez

José G. Salinas

68 78 84



SERVICIOS EN COMUNICACION E INFORMACION TECNICA
GRUPO PROFESIONAL MULTIDISCIPLINARIO

TRADUCCION Y EDICION

TECNOLOGIA DE BAJOS INSUMOS
PARA EL MANEJO DE
MULCHES DE COXISQLES Y ULTISOLES EN AMERICA TROPICAL

Pedro A. Sánchez
José G. Salinas

CONTENIDO

I.	Introducción	1
	A. Suelos Acidos de los Trópicos	3
	B. Base Conceptual de la Tecnología de Bajos Insumos	8
	C. Componentes Esenciales de la Tecnología de Bajos Insumos	16
II.	Selección de Areas	18
III.	Selección de Germoplasma Tolerante a la Acidez	23
	A. Cultivos Alimenticios Anuales	25
	B. Cultivos Perennes y Forestales	31
	C. Pastos Tropicales	33
	D. Conclusiones	41
IV.	Desarrollo y Mantenimiento de una Cobertura Vegetal	42
	A. Métodos de Apertura de Bosques	43
	B. Dinámica del Suelo Después del Desmonte de Bosques Húmedos Tropicales	49
	C. Preparación del Suelo y Establecimiento de Plantas en Bosques Húmedos	55
	D. Métodos de Desmonte en las Sabanas	58
	E. Establecimiento de Cultivos y Pastos en las Sabanas	61
	F. Mantenimiento de Pasturas Establecidas	68
	G. Coberturas, Abonos Verdes y Enrastramientos Manejados	70
	H. Sistema de Cultivos Intercalados y Cultivos Múltiples	76
	I. Conclusiones	83
V.	Manejo de la Acidez del Suelo	85
	A. Cal para Disminuir la Saturación de Aluminio	86
	B. La Cal como Fertilizante de Calcio y Magnesio	91
	C. Selección de Variedades Tolerantes al Aluminio	99
	D. Selección de Variedades Tolerantes al Manganeso	105
	E. Conclusiones	107

VI. Manejo del Fósforo	110
A. Dosis y Métodos de Aplicación del Fósforo	112
B. La Necesidad de Mejorar los Procedimientos de Evaluación de la Fertilidad de los Suelos	117
C. Utilización de Fuentes de Fósforo Menos Solubles	122
D. Disminución de la Fijación de Fósforo con el Encalamiento	129
E. Selección de Variedades Tolerantes a Bajos Niveles de Fósforo Aprovechable en el Suelo	130
F. Utilización Potencial de Asociaciones Más Efectivas de Micorrizas	134
G. Conclusiones	137
VII. Manejo de la Baja Fertilidad Natural del Suelo	137
A. Máxima Utilización de la Fijación Biológica del Nitrógeno	138
B. Aumento en la Eficiencia de la Fertilización con Nitrógeno y Potasio	142
C. Identificación y Corrección de Deficiencias de Azufre y Micronutrientes	146
D. Promoción del Reciclaje de Nutrientes	148
E. Conclusiones	153
VIII. Discusión	154
A. Enfoques de Bajos Insumos Versus Altos Insumos	155
B. Productividad de los Sistemas de Bajos Insumos	159
C. Minería del Suelo o Mejoramiento del Suelo	161
D. Necesidades de Investigación	164
IX. Resumen	169
Bibliografía	

I. INTRODUCCION

El resultado de la competencia entre la producción mundial de alimentos y la población se definirá, en gran medida, en los trópicos, en donde vive la mayor parte de la población desnutrida del mundo. Durante la década de 1965 a 1975 la producción de alimentos aumentó a una tasa ligeramente más rápida que la población en los países deficientes en alimentos (IFPRI, 1978). Este hecho se debe a numerosos factores, entre los cuales el predominante de tipo agronómico, es el desarrollo y la adopción de variedades altamente productivas de diversos cultivos con prácticas agronómicas mejoradas. Muchas de estas variedades fueron seleccionadas por su habilidad para producir altos rendimientos de grano, en condiciones adecuadas de suelo y agua. No es sorprendente que su adopción sea más satisfactoria al ser cultivadas en suelos fértiles con altos niveles de bases, con fertilización suficiente y un suministro de agua apropiado. La eliminación de limitantes del suelo por medio de la aplicación de cantidades necesarias de fertilizantes y correctivos se puede considerar como una "tecnología de altos insumos para el manejo de los suelos". Su concepto básico es el de cambiar el suelo para que se ajuste a las demandas nutricionales de la planta. Este alto suministro de insumos es ampliamente responsable de los niveles actuales de producción de alimentos en el mundo e indudablemente debe continuar donde las condiciones económicas lo permitan.

Sin embargo, la aplicabilidad de tecnologías de altos insumos en el manejo de los suelos disminuye en tierras marginales donde los limitantes del suelo y del agua no se pueden reducir fácilmente a bajo costo. La espiral de precios a la que han llegado los productos derivados del petróleo desde 1973 ha limitado aún más la factibilidad económica de las tecnologías de manejo del suelo basadas en el uso intensivo de insumos comprados, particularmente por agricultores de recursos limitados en los trópicos. Muchos esfuerzos investigativos en los trópicos se están dirigiendo hacia el desarrollo de una tecnología de bajos insumos para el manejo de los suelos la cual no trata de eliminar el uso de fertilizantes o correctivos, sino que trata más bien de maximizar la eficiencia en el uso de insumos adquiridos y empleados a lo largo de una serie de prácticas agrícolas. El concepto básico de la tecnología de bajos insumos para el manejo del suelo es dar el uso más eficiente a los insumos adquiridos, sembrando especies o variedades que sean más tolerantes a los factores limitantes existentes en el suelo y, de ésta forma, disminuir las tasas de aplicación de fertilizantes, para obtener una producción razonable y no necesariamente máxima.

Aunque el conocimiento básico sobre la adaptación de las plantas a las condiciones adversas del suelo ácido (Levit, 1978) ha estado disponible durante décadas, sólo hasta hace pocos años se iniciaron estudios sistemáticos para desarrollar la tecnología basada en este concepto (Foy y Brown, 1964; Spain et al., 1975; NCSU, 1975; Foy y Fleming, 1978; Lonergan, 1978). Dichos esfuerzos han causado una

controversia considerable y algunas malas interpretaciones en la literatura popular, tales como la creencia de que se pueden desarrollar cultivos "a prueba de fertilizantes" y la preocupación de que ocurra una degradación del suelo y de los nutrimentos disponibles.

El propósito de esta revisión es reunir ejemplos de la tecnología de bajos insumos para el manejo de suelos, adaptada a los suelos ácidos, bien drenados, de baja fertilidad natural existentes en los trópicos de América y que se clasifican en su mayoría, como Oxisoles y Ultisoles. Estos ejemplos son componentes de sistemas globales de producción, pero rara vez poseen todos los componentes necesarios que han sido desarrollados para un sistema específico. La mayoría de los ejemplos provienen de América Tropical, reflejando la experiencia de los autores, sin restar importancia a trabajos relacionados y realizados en otras partes del mundo. En este trabajo se emplea la terminología de la taxonomía de suelos (Soil Conservation Service, 1975), incluyendo los regímenes de humedad del suelo.

A. Suelos Acidos de los Trópicos

Al nivel más amplio de generalización existen tres vías esenciales para incrementar la producción de alimentos en el trópico : incrementando la producción por unidad de área en regiones actualmente cultivadas; abriendo nuevas tierras para cultivar; y expandiendo las tierras irrigadas. Las dos primeras requieren de la disminución o eliminación de los limitantes del suelo, mientras que la tercera elimina la esca-

sez de agua, como el limitante más importante. Bentley et al. (1980), examinaron estas tres alternativas y concluyeron que las tres son necesarias, aunque la alternativa de riego está limitada para áreas relativamente pequeñas y es la más costosa de las tres. Es poco cuestionable el hecho de que aumentar la productividad en tierras que están cultivadas es la vía principal para elevar la producción mundial de alimentos. Sin embargo, estimativos recientes de la FAO, citados por Dudal (1980), muestran que, para que la producción de alimentos per capita permanezca al nivel actual, aún inadecuado, la producción de alimentos se debe incrementar en un 60% en los próximos 20 años. Además, Dudal estimó que el incremento de los rendimientos en las tierras en actual uso, no es suficiente; con el fin de alcanzar este propósito, en la próximas dos décadas es necesario incorporar 200 millones de hectáreas adicionales a la agricultura. Esta cantidad es aproximadamente equivalente al área cultivada actualmente en los Estados Unidos. Será posible ésto? La respuesta depende en gran medida del uso que se haga de los suelos ácidos de los trópicos.

1. Importancia y Extensión

Actualmente, el mundo está empleando cerca de un 40% de sus recursos de tierras potencialmente arables (Buringh et al., 1975). El potencial enorme para la expansión de la frontera agrícola del mundo, está en el bosque húmedo tropical y en las regiones de sabana, ecosistemas dominados por suelos ácidos e infértiles, clasificados

en su mayoría como Oxisoles y Ultisoles (Kellogg y Orvedal, 1969); National Academy of Science, 1977a). Estas extensas regiones poseen, en gran proporción, una topografía favorable para la agricultura, temperaturas adecuadas para el crecimiento de las plantas durante todo el año, humedad suficiente durante el año en un 70% de la región, y de 6 a 9 meses en el 30% restante (Sánchez, 1977). Los principales factores limitantes que previenen el desarrollo agrícola en estas áreas son la baja fertilidad natural del suelo, el transporte limitado y la carencia de una infraestructura de mercado.

El Cuadro 1 muestra la extensión aproximada de áreas dominadas por Oxisoles y Ultisoles en los trópicos. En total, suman cerca de 1582 millones de hectáreas o un 43% del mundo tropical. La proporción de Oxisoles y Ultisoles difiere de las estimaciones anteriores (Sánchez, 1976), puesto que la nueva información muestra que hay menos Oxisoles de lo establecido previamente en Africa y América Latina. De cualquier manera, la suma de áreas dominadas por Oxisoles y Ultisoles permanece similar a las estimaciones anteriores. La concentración abundante de Oxisoles se presenta en las sabanas de América del Sur, la Amazonía oriental y parte de Africa central. Estos suelos generalmente se encuentran localizados en superficies geológicas antiguas y estables, las cuales se tornan atractivas para la agricultura mecanizada. Los Ultisoles se encuentran dispersos en grandes áreas de América tropical, Africa y el sureste de Asia. Muchas de estas regiones se han desarrollado rápidamente.

Existen otros suelos ácidos, con propiedades y potenciales similares incluidos en el Cuadro 1 : Inceptisoles ácidos y bien drenados (Dystropepts); suelos ácidos de cenizas volcánicas (Dystrandeps); y arenas rojas y ácidas bien drenadas (Quartzipsaments Oxíc). En este artículo se excluyen los suelos ácidos mal drenados y que tienen un régimen de humedad del suelo ácuico.

América tropical, en un nivel amplio de generalización, puede ser subdividada en dos regiones principales, con base en los sistemas agrícolas y los limitantes del suelo (Sánchez y Cochrane, 1980). Cerca de un 30% de la América tropical (405 millones de hectáreas) está dominada por suelos con alto nivel de bases, relativamente fértiles, que sostienen poblaciones densas. El 70% de la porción tropical del hemisferio occidental restante está dominado por suelos ácidos e infértiles de los órdenes Oxisoles y Ultisoles, con densidades de población relativamente bajas y la mayoría bajo vegetación de bosque y de sabana.

A pesar de la creencia ampliamente difundida de que los Oxisoles y Ultisoles no pueden sostener una agricultura intensiva y sostenida en los trópicos (Mc Neil, 1964 : Goodland e Irwin, 1975), existe una amplia evidencia de que estos suelos pueden ser cultivados continuamente y manejados intensivamente para el crecimiento de cultivos anuales (Sánchez, 1977; Marchetti y Machado, 1980), pastos (Vincente - Chandler et al, 1974) y cultivos perennes (Alvim, 1976). Este también es el caso de los Oxisoles y Ultisoles de Hawái y los Ultisoles

del suroriente de China, los cuales sostienen densas poblaciones.

2. Los Principales Limitantes

Los principales limitantes relacionados con los suelos de América tropical y su región de suelos ácidos e infértiles se presentan en el Cuadro 2 con base en estimaciones preliminares. Los más ampliamente difundidos en las regiones de Oxisoles-Ultisoles son más de naturaleza química que física, incluyendo las deficiencias de fósforo, nitrógeno, potasio, azufre, calcio, magnesio y zinc, más la toxicidad por aluminio y la alta fijación de fósforo. Los limitantes físicos del suelo más importantes son la baja capacidad de retención de agua disponible en muchos Oxisoles y la susceptibilidad a la erosión y compactación de muchos Ultisoles con textura arenosa en la capa superficial del suelo. El riesgo de la presencia de lateritas cubre una extensión menor y la mayoría de las plintitas blandas se presentan en el subsuelo, en topografía llana y no propensa a la erosión. En contraste, los limitantes del suelo más importantes de las regiones con suelos con altos niveles de bases en América tropical son el estrés por sequía, deficiencias de nitrógeno y riesgos de erosión (Sánchez y Cochrane, 1980).

Cuando los limitantes químicos del suelo se eliminan encalando y aplicando fertilizantes, las productividades de estos Oxisoles y Ultisoles se ubican entre las mayores en el mundo. Por ejemplo, la Figura 1 muestra la producción anual de materia seca del pasto ele-

fante (*Pennisetum purpureum*) con fertilización intensiva con nitrógeno en Ultisoles de Puerto Rico y donde todos los limitantes de la fertilidad han sido eliminados. Esta producción se aproxima al potencial máximo calculado para las latitudes tropicales de 60 ton/ha/año de materia seca, de acuerdo con DeWitt (1967). En la Figura 2 se muestra otro ejemplo en el cual se obtuvieron excelentes producciones de grano de maíz del orden de 6.3 ton/ha/cosecha, en un Oxisol arcilloso de Brasilia, Brasil, cuando su alto requerimiento de fósforo se suplió con una aplicación al voleo de 563 Kg de P/ha y se corrigieron los otros limitantes químicos del suelo mediante encalamiento y fertilización.

Estas estrategias de manejo pueden ser muy beneficiosas aún a los precios actuales, cuando el mercado provee una relación favorable entre el precio de la cosecha y el costo del fertilizante. Cuando quiera que las consideraciones económicas y de infraestructura hagan rentable esta estrategia de altos insumos, debería aplicarse vigorosamente.

B. Base Conceptual de la Tecnología de Bajos Insumos

En la mayoría de las regiones tropicales con suelos ácidos no existen condiciones favorables de mercado ya sea porque los fertilizantes y la cal son costosos o no están del todo disponibles debido a que su transporte es excesivamente costoso, o simplemente debido a

que los riesgos son muy altos. Las dos primeras situaciones se explican por sí solas. La tercera se ilustra en la Figura 3, mostrando la respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la aplicación de fósforo, en un Dystrandept Típico de Popayán, Colombia, con una alta capacidad de fijación de fósforo. La tasa de aplicación óptima de fósforo, de acuerdo con el análisis marginal, fue de 507 Kg P/ha, tomando en cuenta los efectos residuales para dos cosechas consecutivas. Al analizar los costos, los economistas encontraron que los agricultores necesitaban invertir un total de US\$1500/ha/cosecha para aproximarse a estas producciones máximas y obtener una ganancia neta de US\$375/ha (CIAT, 1979). Aunque esto representa un 25% de retorno sobre lo invertido, muchos agricultores de recursos limitados no están inclinados a realizar tal inversión, considerando el riesgo debido a una alta variabilidad en los rendimientos causada por sequías, daños por ataques de insectos y fluctuaciones impredecibles de los precios.

La tecnología de bajos insumos para el manejo de suelos está basada en tres principios esenciales : (1) la adaptación de las plantas a los factores edáficos limitantes, en vez de la eliminación de dichos factores para satisfacer los requerimientos de las plantas; (2) la maximización de la producción por unidad del fertilizante químico aplicado; y (3) el uso ventajoso de los atributos favorables de los suelos ácidos e infértiles. Es necesario enfatizar que no se contempla la eliminación de la fertilización.

1. El Uso de Plantas Adaptadas a los Factores
Edáficos Limitantes

El primer concepto básico de la tecnología de bajos insumos para suelos ácidos es el de aliviar o superar ciertos limitantes del suelo, simplemente empleando variedades o especies que sean tolerantes a éstos. Entre los factores limitantes del suelo enumerados en el Cuadro 2 existe mayor conocimiento disponible sobre la tolerancia a bajos niveles de fósforo disponible en el suelo. Se dispone de menor información sobre la tolerancia a la toxicidad por manganeso y a bajos niveles de otros nutrimentos.

Las Figuras 4 y 5 ilustran el concepto con dos patrones de respuesta en rendimiento al encalamiento, en dos Oxisoles de sabana. La Figura 4 muestra la respuesta diferencial de dos variedades de arroz de secano sembradas en un Oxisol de Carimagua, Colombia, con un pH de 4.5 y una saturación de aluminio del 80%, antes de aplicar la cal. La variedad de porte alto, Colombia 1, produjo el doble sin aplicación de cal, que la variedad de porte bajo, IR 5. La variedad Colombia 1 respondió positivamente sólo al primer incremento de cal (0.5 ton/ha) y negativamente a incrementos posteriores de cal. Spain et al, (1975) atribuyeron este comportamiento a una respuesta nutricional al contenido de calcio y magnesio en la cal y a su volcamiento a tasas más altas de ésta. En contraste, la variedad IR 5, desarrollada en condiciones de alta fertilidad en Filipinas, produjo una

respuesta típicamente cuadrática a las aplicaciones de cal, llegando a su máxima producción al nivel más alto de la aplicación de cal, la cual correspondió a un pH de 5.5 y a una saturación de aluminio del 15%. El máximo rendimiento alcanzado por la variedad IR 5 que es susceptible al aluminio fué menor que la máxima producción alcanzada por la variedad Colombia 1 que es tolerante al aluminio, la cual requirió menos de un décimo de cal. La respuesta diferencial que se muestra en la Figura 4 muestra la ventaja para el cultivar tolerante al aluminio.

La Figura 5 ilustra un tipo de respuesta diferencial menos drástica pero quizá más común a la aplicación de cal. Dos híbridos de sorgo de grano se cultivaron a diferentes niveles de aplicación de cal en un Typic Haplustox cerca de Brasilia, Brasil, el cual tenía un pH de 4.4 y una saturación de aluminio del 79% (NCSU, 1976; Salinas, 1978). El híbrido Taylor Evans Y-101 sin encalamiento produjo cerca de cuatro veces más grano que el híbrido RS-610. Esta diferencia disminuyó con el incremento en las aplicaciones de cal y desapareció a la alta tasa de aplicación, en cuyo caso ambos híbridos llegaron a la misma producción de 6.8 ton/ha. Las líneas punteadas de estas figuras indican economías considerables en la cal requerida para obtener 80 - 90 % de la producción máxima. Para obtener un 80% de la producción máxima, el híbrido tolerante al aluminio requirió 1.3 ton de cal/ha y el híbrido susceptible requirió 2.9 ton de cal/ha. Para obtener un 90% de la producción máxima, los requerimientos de

cal para el híbrido tolerante al aluminio fueron de 2.0 ton/ha y de 5.2 ton/ha para el susceptible. Por consiguiente, el uso de variedades tolerantes al aluminio puede disminuir significativamente el suministro de cal, sin un sacrificio en la producción con un 80-90% del máximo.

Estos dos ejemplos ilustran la necesidad de que los investigadores incluyan más tratamientos con dosis de insumos más bajas que las utilizadas en el pasado, con el propósito de observar si existe un diferencial de tolerancia. Si estos experimentos no hubieran incluido tasas de aplicación de cal de 0.5 o 1 ton/ha, los efectos no se habrían podido observar debido a que las diferencias en las variedades tienden a desaparecer con altas dosis de insumos.

2. Maximización de la Producción por

Unidad de Fertilizante Aplicado

Los métodos tradicionales empleados para la determinación de las tasas óptimas de aplicación de fertilizantes se basan en el análisis marginal, en el cual el nivel óptimo se alcanza cuando el ingreso del último incremento de fertilizante iguala al costo adicionado. Este enfoque está diseñado para maximizar rendimientos y rentabilidad por unidad de área. Una desventaja principal de este enfoque es que las tasas de aplicación de fertilizante económicamente óptimas con frecuencia caen en la porción llana de la curva de respuesta, en donde incrementos grandes en el suministro de fertilizantes causan

incrementos pequeños en los rendimientos. Dadas las incertidumbres asociadas con la predicción de los rendimientos en condiciones tropicales, estos pequeños incrementos del rendimiento son rara vez realistas. Un rasgo común de las curvas de respuesta del rendimiento en las regiones de Oxisoles-Ultisoles es que la cantidad de fertilizante requerida para producir un 80% del rendimiento máximo u óptimo es considerablemente menor que la cantidad requerida para llegar al óptimo o máximo punto. En la Figura 3, el nivel óptimo de aplicación de fósforo, de acuerdo con el análisis marginal, es de 507 Kg de P/ha. Si sólo se desea un 80% de ese rendimiento óptimo, esta cantidad disminuye a menos de la mitad (242 Kg P/ha). Otros ejemplos de las regiones de Oxisoles-Ultisoles presentados en el Cuadro 3 muestran que las tasas de aplicación de fertilizantes o de cal decrecen entre un 33-76%, cuando el rendimiento buscado se disminuye al 80% del máximo. Este cuadro incluye dos ejemplos del efecto de las aplicaciones de fósforo y cal por un período de tiempo suficientemente largo para evaluar adecuadamente sus efectos residuales. En estos casos, la reducción del insumo oscila entre 50-75%. Consecuentemente, al disminuir las expectativas de rendimiento, el costo del uso de estos insumos se puede reducir en una cantidad considerable.

Boyd (1970, 1974) en Inglaterra y Bartholomew (1972) en los EE.UU. recopilaron un gran número de funciones de respuesta a la aplicación de fertilizantes por todo el mundo y concluyeron que, en muchos casos,

las curvas de respuesta a la aplicación de fertilizantes se pueden caracterizar por un incremento lineal marcado, seguido por una línea completamente horizontal. En esencia, esta aproximación sigue la Ley del Mínimo de Liebig. Se han desarrollado diversas técnicas para poner este principio en la práctica de la interpretación de curvas de respuesta a la aplicación de fertilizantes (Cate y Nelson, 1971; Waugh et al., 1975; Wagoner y Norvell, 1979). Estos métodos se utilizan ahora ampliamente en América tropical.

En la Figura 6 se muestra una comparación del enfoque lineal versus el análisis marginal convencional, con ecuaciones cuadráticas, empleando una serie de datos de trigo en Bolivia. Esta figura muestra una tasa recomendada de aplicación de nitrógeno inferior con el modelo lineal. Esta tasa aparece en un punto a lo largo de la porción lineal de la curva de respuesta, donde la eficiencia de la fertilización es más alta, medida en términos del rendimiento del cultivo por unidad de insumo de fertilizante.

Uno de los autores de esta revisión empleó datos previamente publicados tomados de una serie de estudios de respuesta a la aplicación de nitrógeno en arroz, en el Perú, para comparar las dos formas de desarrollar recomendaciones de aplicación de fertilizantes (Sánchez et al., 1973). La recomendación promedia de nitrógeno fue de 224 Kg N/ha de acuerdo con el modelo cuadrático y de 170 Kg N/ha de acuerdo con el modelo lineal. Las diferencias de los retornos brutos a la fertilización no fueron significativas, pero el retorno neto

por dólar invertido en fertilizante nitrogenado fue de \$8.80 en el modelo lineal versus \$6.10 en el modelo cuadrático (Sánchez, 1976). Aunque la aplicabilidad del modelo lineal debe ser validada localmente antes de emplearlo como base para la recomendación de fertilizantes, el concepto de recomendar tasas de aplicación que producirán el máximo rendimiento por unidad de insumo de fertilizante a un nivel de rendimiento aceptable hace parte de la tecnología de bajos insumos.

Es necesario hacer énfasis en que esta aproximación difiere de las pruebas sencillas de fertilizantes de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), las cuales siempre abogan más por el uso de tasas bajas de aplicación de fertilizantes en lugar de las sugeridas por el análisis marginal (Hauser, 1974). La diferencia radica en que, con el enfoque lineal, los rendimientos con las tasas recomendadas de aplicación de fertilizantes están en el máximo rendimiento, en tanto que las pruebas de la FAO, consistentes, por lo general, en tasas bajas de aplicación de fertilizantes, rara vez se aproximan a los rendimientos máximos. Ambos métodos enfatizan que se trabaje en la porción lineal de la curva de respuesta a fertilizantes que producen el máximo rendimiento por unidad de insumo, pero difieren en los niveles esperados de rendimiento.

Además de los métodos para determinar recomendaciones de fertilizantes, existe un número de prácticas agronómicas que también aumentan la eficiencia del uso de fertilizantes, así como mejores fuentes de fertilizantes, épocas de aplicación y métodos de incorporación.

Estas y otras prácticas se discutirán en otras secciones de esta revisión.

3. Uso Ventajoso de las Propiedades Favorables de los Suelos Acidos e Infértiles

Mucho Oxisoles y Ultisoles en su estado ácido poseen diversos factores agronómicos positivos que pueden ser empleados ventajosamente. Manteniendo el suelo ácido, la solubilidad de la roca fosfórica de lenta disponibilidad es mayor que en suelo encalado y el crecimiento de las malezas disminuye considerablemente en comparación con un suelo fertilizado y encalado. Además, la baja capacidad efectiva de intercambio catiónico (CEIC) de estos suelos favorece al movimiento descendente del calcio y el magnesio aplicados. En secciones posteriores de esta revisión se discutirán ejemplos de estas observaciones.

C. Componentes Esenciales de la Tecnología de Bajos Insumos

Como bloques de construcción para la tecnología de bajos insumos se están desarrollando varios conceptos o técnicas para el manejo del suelo en Oxisoles y Ultisoles de los trópicos.

La siguiente es una lista parcial, algunos de los cuales pueden ser combinados para ciertos sistemas agrícolas :

1. Selección de las tierras más apropiadas donde la tecnología de bajos insumos tenga la ventaja comparativa sobre la tecnología

de altos insumos debido a las propiedades del suelo, a la topografía y al acceso al mercado.

2. El uso de especies y variedades de plantas que sean más tolerantes a la mayoría de los factores limitantes de los suelos ácidos y que también se adapten al clima, plagas y enfermedades.

3. La puesta en marcha de prácticas eficientes de bajo costo de desmonte, establecimiento de plantas, sistemas de cultivo y otras, con el fin de desarrollar y mantener una cobertura vegetal del suelo.

4. Manejo de la acidez del suelo con el mínimo de insumos, haciendo énfasis en el estímulo de un desarrollo radical profundo en el subsuelo.

5. Manejo de fertilizantes fosforados al costo más bajo posible, enfatizando el aumento de fuentes baratas de fósforo y prolongando los efectos residuales de la aplicación.

6. Maximizar el uso de la fijación biológica de nitrógeno, con énfasis en cepas de *Rhizobium* tolerantes a la acidez.

7. Identificar y corregir las deficiencias de otros nutrimentos esenciales para las plantas.

II. SELECCION DE AREAS

El primer paso es seleccionar áreas con suelos y posiciones fisiográficas más apropiadas para aplicar la tecnología de bajos insumos. En esta selección se deben evitar las mejores tierras en términos de su alta fertilidad natural, su potencial de riego o su proximidad a los mercados. La mayoría de estas tierras pueden ser manejadas más efectivamente con tecnología de altos insumos. En América tropical, desafortunadamente no siempre éste es el caso. Comúnmente se encuentran valles donde los mejores suelos de la parte baja están sometidos a sistemas de manejo extensivo con el uso de bajos insumos, en tanto que en terrenos adyacentes con pendientes elevadas se hacen intentos por usar una agricultura intensiva. En muchos casos, esto se debe a los sistemas de tenencia de la tierra. Se deberían hacer esfuerzos por intensificar la producción en aquellos suelos con las menores limitaciones químicas.

Los esquemas de evaluación en gran escala han mejorado el entendimiento de las áreas adecuadas para la tecnología de bajos insumos en América tropical. Aproximadamente el 6% de la Amazonía (30 millones de hectáreas) está dominado por suelos bien drenados y con un alto nivel de bases, los cuales se clasifican como Alfisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Mollisoles (Cochrane y Sánchez, 1981). La alta fertilidad de estos suelos ofrece una ventaja comparativa para la producción intensiva de cultivos alimenticios anuales o para la utilización

de cultivos susceptibles a la acidez del suelo como el cacao (*Theobroma cacao*). Además, el mismo estudio indica que el Amazonas tiene alrededor de 116 millones de hectáreas con suelos mal drenados en planicies inundables o pantanos y que representan un 24% de la cuenca amazónica. Algunas de las áreas inundables de tipo aluvial ya se encuentran en uso intensivo, tales como muchas "várzeas" en Brasil y muchas "restingas" en Perú y Ecuador. Sin embargo, los riesgos de inundación limitan el potencial de producción en las topografías más bajas.

Por otras razones diferentes, se deben evitar también los suelos ácidos e infértiles con limitaciones físicas severas, tales como una capa arable superficial, pendientes pronunciadas y suelos con arena gruesa clasificados como Psamments o Spodosols, que a menudo son llamados "Podzoles tropicales". Este último grupo de suelos tiene una baja fertilidad natural extrema y presentan riesgos de lixiviación y erosión. Este último grupo cubre alrededor de 41 millones de hectáreas equivalentes a un 8.5% de la Amazonía (Cochrane y Sanchez, 1981). Los Psamments o Spodosols representan sólo el 2.2% de la Amazonía y presentan en forma combinada las peores limitaciones edáficas tanto físicas como químicas.

El área total en la región amazónica en donde puede aplicarse la tecnología de bajos insumos es, en consecuencia, del orden de 275 millones de hectáreas o 57% de la cuenca amazónica con Oxisoles y Ultisoles que tienen pendientes menores que un 8%.

En las regiones de sabana de América tropical resulta más fácil identificar los suelos que se deben evitar, pero los criterios son los mismos que en las regiones de bosque. Algunas de las islas de suelos de alta fertilidad ya se encuentran en producción intensiva, como los Llanos Orientales de Venezuela. Los suelos superficiales y los suelos de pendientes pronunciadas se pueden identificar fácilmente en las sabanas. Las extensas áreas de planicies inundables estacionalmente, tales como parte de los Llanos Occidentales de Venezuela y su extensión hacia Colombia y parte del Beni de Bolivia y el Pantanal en Brasil, requerirán una estrategia de manejo diferente.

El Estudio sobre Recursos de Tierra de América tropical por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, 1978), indica que en las regiones de sabana existen 71 millones de hectáreas con Oxisoles y Ultisoles que tienen pendientes menores del 8% (T.T.Cochrane, comunicación personal). Estas tierras corresponden aproximadamente al 24% de las regiones de sabana y es en ellas en donde, en principio, la tecnología de bajos insumos descrita en este artículo puede ser aplicada. Sin embargo, estos estimados son conservadores puesto que es posible producir carne con pasturas a base de leguminosas en terrenos con pendientes pronunciadas. Adicionalmente, existen 19 millones de hectáreas de sabanas con Oxisoles y Ultisoles con pendientes entre 8-30% que podrían ser usadas con el propósito anterior.

Aunque las generalizaciones anteriores proporcionan un panorama general, la selección real de áreas debe hacerse en sitios específicos.

Los parámetros edáficos no son en sí mismos suficientes para una selección apropiada. En consecuencia, la clasificación de tierras es una herramienta más útil debido a que considera, además de las características edáficas, el clima, la fisiografía, la vegetación nativa y la infraestructura. El enfoque de los sistemas de tierra usado en el Estudio de Recursos de Tierras del CIAT parece ser un método apropiado para evaluar el potencial de estas extensas áreas. Usando una escala de 1:1 millón, alrededor de 500 sistemas han sido identificados hasta el presente y cada sistema representa un patrón repetitivo de clima, suelo, fisiografía y vegetación (Cochrane, 1979). Los suelos y el clima se clasifican según sistemas técnicos tales como el índice de humedad disponible (Hargreaves, 1977; Hancock et al., 1979) y el Sistema de Clasificación de Suelos por su Fertilidad (Buol et al., 1975). Los datos se agrupan en cintas de computadora (Cochrane et al., 1979) y los usuarios de estas cintas pueden examinar mapas elaborados en computadora de regiones específicas, identificando uno o varios parámetros, tales como suelos superficiales o suelos con una saturación de aluminio mayor del 60% a una cierta profundidad.

En Brasil se ha desarrollado una modificación del Sistema de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), tomando en cuenta la realidad del medio ambiente tropical. Ramalho et al., (1978) redefinió las clases de capacidad de uso de las tierras en términos de alto, moderado y bajo uso de insumos. Niveles altos de insumos significa un uso inten-

sivos de fertilizantes, cal, mecanización y otra tecnología nueva.

Uso "moderado" de insumos implica utilización limitada de fertilizantes y de mecanización agrícola. Esto corresponde al concepto de la tecnología de bajos insumos dado en este artículo. El "bajo" uso de insumos de Ramalho y colaboradores, implica trabajo manual y poca o ninguna aplicación de insumos. Este sistema interpretativo ha sido aplicado al levantamiento de suelos RADAM en la Amazonía brasilera (Ministerio de Minas y Energía, 1973-1979).

Consecuentemente, para los sistemas de tecnología de bajos insumos en el manejo de suelos es apropiado seleccionar Oxisoles y Ultisoles con pendientes menores que el 8%, evitar suelos con un alto contenido de bases que pueden ser utilizados más intensivamente y evitar suelos ácidos con limitaciones físicas severas tales como pendientes pronunciadas, capa arable superficial, los Spodosoles y suelos mal drenados o suelos inundables estacionalmente.

III. SELECCION DE GERMOPLASMA

TOLERANTE A LA ACIDEZ

Un número considerable de especies de plantas de importancia económica generalmente se consideran como tolerantes a las condiciones de los suelos ácidos en los trópicos. La mayoría de éstas tienen su centro de origen en regiones de suelos ácidos, lo cual indica que la adaptación a los factores edáficos limitantes forma parte del proceso evolutivo. Algunas variedades de ciertas especies también poseen tolerancia a la acidez del suelo, pero la especie en general no.

Estas variedades probablemente han sido seleccionadas involuntariamente por agricultores o cultivadores, debido a su comportamiento superior en condiciones de los suelos ácidos. Ejemplos de dicha selección involuntaria se encuentran bien documentados en la literatura (Foy et al., 1974; Silva, 1976; artini et al., 1977; Lafever et al., 1977).

El término tolerancia a los suelos ácidos cubre una variedad de tolerancias individuales a los factores adversos del suelo y a las interacciones que ocurren entre ellos. Al mencionar el término en este artículo sólo indica una valoración cuantitativa de la adaptación de la planta a la acidez del suelo en condiciones de bajos niveles de cal o fertilizantes. Las evaluaciones cuantitativas de las tolerancias de las plantas a los estreses de los suelos ácidos incluyen tolerancias a niveles altos de aluminio o manganeso y a las deficien-

cias de calcio, magnesio, fósforo y ciertos micronutrientes, principalmente, zinc y cobre. Un ejemplo de una interacción entre este grupo, es que el nivel de calcio en la solución del suelo puede atenuar parcialmente la toxicidad del aluminio en muchas especies de plantas (Foy y Fleming, 1978; Rhue, 1979). Las tolerancias a los estreses por aluminio y bajo nivel de fósforo se presentan juntas en los cultivares de trigo, sorgo, arroz y frijol, pero no en el maíz (Foy y Brown, 1964; Salinas, 1978). Sin embargo, los mecanismos fisiológicos involucrados están más allá del objetivo de este artículo. Si el lector desea mayores detalles se le recomienda revisar los artículos de los libros editados por Wright (1976), Jung (1978), Andrew y Kamprath (1978) y Musell y Staples (1979).

Duke (1978) recopiló un lista de 1031 especies de plantas de importancia económica con tolerancias conocidas a las condiciones ambientales adversas. Se incluyeron tolerancias a "suelos ácidos", a "suelos lateríticos" y a la "toxicidad por aluminio". Las dos primeras categorías correspondieron a evaluaciones cualitativas y la tercera identificó solamente aquellas especies para las cuales se han realizado estudios de tolerancia al aluminio.

Pese a que la lista de Duke es preliminar e incompleta ilustró lo amplia que es la base de germoplasma tolerante a la acidez. Incluyó un total de 397 especies tolerantes, ya sea a suelos ácidos, a suelos lateríticos o a la toxicidad por aluminio. Entre éstas, 143 especies

satisfacen dos de estos criterios y 29, los tres. Esta última cifra refleja el número limitado de especies para las cuales se han realizado estudios de tolerancia al aluminio. Los Cuadros 4 y 6-8 presentan listas de especies seleccionadas de la compilación realizada por Duke, las cuales satisfacen, por lo menos, dos de estos criterios. Estos cuadros incluyen modificaciones, adiciones u omisiones hechas por los autores de esta revisión, con base en sus propias observaciones.

A. Cultivos Alimenticios Anuales

El Cuadro 4 presenta una lista de varias de las especies básicas alimenticias más importantes del mundo que poseen un grado considerable de tolerancia a los suelos ácidos. Siete de estas - yuca, caupí, maní, guandul, plátano y arroz - se pueden considerar como tolerantes a la acidez, aunque hay algunos cultivares sensibles a la acidez. El grado de conocimiento sobre la naturaleza y el grado de tolerancia a la acidez del suelo varía de una especie a otra.

La yuca *Manihot esculenta*, es más tolerante a niveles altos de aluminio y manganeso y a los niveles bajos de calcio, nitrógeno y potasio, que muchas otras especies (Gómez y Howeler, 1980; Cock, 1981). Aunque la yuca tiene altos requerimientos de fósforo para su crecimiento máximo, aparentemente puede utilizar fuentes de fósforo relativamente inaprovechables por medio de las asociaciones con micorrizas (Cock y Howeler, 1978; Edwards y Kang, 1978). Muchos cultivadores de yuca responden negativamente al encalado del suelo ya que, a niveles de pH alto, se induce una deficiencia de zinc (Spain et al., 1975). La

habilidad de la yuca para tolerar condiciones de estrés causado por la acidez del suelo se puede deber a un mecanismo interesante. Cock (1981) observó que las hojas de la yuca mantenían un estado nutricional adecuado en presencia de una baja disponibilidad de nutrimentos (Cuadro 5). En lugar de diluir su concentración de nutrimentos como ocurre en otras plantas, la yuca responde al estrés nutricional disminuyendo su índice de área foliar. Esta es una razón por la cual es difícil evaluar los síntomas visuales de la deficiencia de nutrimentos en yuca cultivada en suelos ácidos.

El caupí (*Vigna unguiculata*) es la especie de leguminosa considerada como la más tolerante a las condiciones de estrés por acidez del suelo y específicamente a la toxicidad por aluminio (Spain et al., 1975; Munns, 1978). En condiciones de campo en Oxisoles el caupí comúnmente supera en rendimiento a otras leguminosas de grano tales como soya y frijol *Phaseolus vulgaris*, a niveles altos de saturación de aluminio (Spain et al., 1975). Como en otras leguminosas, la tolerancia de los rizobios a la acidez del suelo es tan importante como la tolerancia de la planta de caupí a la acidez del suelo (Keyser et al., 1977; Munns, 1978).

El maní (*Arachis hypogaea*) también se considera como tolerante a la acidez del suelo (Munns, 1978), a pesar de que tiene un requerimiento de calcio relativamente alto. Afortunadamente, pequeñas cantidades de cal pueden proveer calcio suficiente sin alterar el

pH del suelo, para obtener rendimientos máximos en los Oxisoles y Ultisoles de los Llanos de Venezuela (C. Sánchez, 1977).

El plátano (*Musa paradisiaca*) es una de las fuentes de carbohidratos más importantes en muchas áreas de los trópicos húmedos de África y América. En Ultisoles de Puerto Rico se ha demostrado su tolerancia al aluminio y, en general, su adaptabilidad a los estreses por la acidez del suelo (Vicente - Chandler y Figarella, 1976; Plucknett, 1978), como también en Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia (CIAT, 1975). Sin embargo, este cultivo posee requerimientos de nitrógeno y potasio relativamente altos. Se han registrado respuestas marcadamente positivas a las aplicaciones de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y micronutrientes (Caro Costas et al., 1964; Silva y Vicente-Chandler, 1974; Samuels et al., 1975).

La papa (*Solanum tuberosum*) ha sido considerada durante largo tiempo como un cultivo tolerante a la acidez. Los cultivadores de papa mantienen los valores de pH por encima de 5.5 con el propósito de controlar al patógeno *Streptomyces scorbies*. Se han establecido diferencias definitivas entre variedades en cuanto a la tolerancia al aluminio (Villgarcía, 1973). Los problemas por enfermedades en regímenes de temperaturas isohipertérmicas constituyen una limitación mayor que las limitaciones por la acidez del suelo.

La tolerancia del arroz (*Oryza sativa*) a la acidez del suelo en condiciones de inundación normalmente no tiene importancia. Excepto

en algunos suelos ácidos sulfatados, el pH de la mayoría de los suelos ácidos se eleva hasta 6 y 7 con inundación, como consecuencia de la reducción química del hierro y de los óxidos e hidróxidos de manganeso (Ponnamperuma, 1972). A estos niveles de pH, el aluminio intercambiable es precipitado, lo cual elimina la toxicidad por aluminio. Muchas variedades de arroz en sistemas de secano son totalmente tolerantes al aluminio (como se muestra en la Fig. 4) y/o a bajos niveles de fósforo aprovechable (Spain et al., 1975; Howeler y Cadavid, 1976; Salinas y Sánchez, 1976; Ponnamperuma, 1977; Salinas, 1978). También se han identificado diferencias varietales en la tolerancia a la toxicidad por manganeso y a la deficiencia de hierro en suelos ácidos (Ponnamperuma, 1976). En las regiones de Oxisoles - Ultisoles de América Latina, el arroz de secano generalmente se considera como más tolerante al estrés por la acidez del suelo que el maíz (Salinas y Sánchez, 1976; Sánchez, 1977).

Hay otras leguminosas de grano menos comunes que también se consideran como tolerantes a los estreses causados por la acidez del suelo en Oxisoles y Ultisoles de los trópicos, aunque existe poca información cuantitativa acerca de su grado de tolerancia. Según Munns (1978) éstas incluyen guandul (*Cajanus cajan*), frijol lima (*Phaseolus lunatus*), frijol alado (*Psophocarpus tetragonolobus*) y frijol mungo (*Vigna radiata*).

El Cuadro 4 también incluye cinco especies para las cuales ciertos cultivares se han identificado como tolerantes a la acidez del suelo,

pero no la especie considerada globalmente. Existe gran variabilidad en el frijol *Phaseolus vulgaris*, siendo algunos cultivares tolerantes a la toxicidad por aluminio y/o a bajos niveles de fósforo y otros altamente sensibles a ambos estreses (Spain et al., 1975; Whiteaker et al., 1976; Salinas, 1978; CIAT, 1977, 1978, 1979 y 1980). En esta especie los estreses causados por enfermedades e insectos, particularmente en regímenes de temperaturas isohipertérmicas, son más limitantes de la producción que los factores edáficos adversos.

Aunque el maíz (*Zea mays*) es considerado por algunos investigadores como generalmente tolerante a la acidez (Rhué, 1979), los ensayos de respuesta al encalamiento en los trópicos tienden a demostrar lo contrario. Sin embargo, varios híbridos y compuestos poseen un grado marcado de tolerancia al aluminio y/o tolerancia al estrés por fósforo (Fox, 1978; Salinas, 1978).

Como especie, el sorgo de grano (*Sorghum bicolor*) presenta una adaptación pobre a las condiciones de los suelos ácidos. Muchos de los trabajos de mejoramiento varietal en este cultivo se han realizado en suelos calcáreos o neutros. Afortunadamente, existen diferencias entre cultivares en términos de la tolerancia al aluminio (Brown y Jones, 1977a). En la Figura 5 se muestra un ejemplo adaptado de Salinas (1978). Brown y Jones (1977a) también han informado sobre diferencias marcadas para el estrés por cobre, pero ninguna para la toxicidad por manganeso. También existen diferencias entre cultivares

en cuanto a la tolerancia al estrés por fósforo (Brown et al., 1977).

Como especie, quizás la soya (*Glycine max*) es la menos tolerante de las mencionadas previamente, sobre todo a las condiciones de acidez del suelo. Existen diferencias varietales considerables con respecto a la tolerancia al aluminio (Sartain y Kamprath, 1978; Muxilli et al., 1978; Miranda y Lobato, 1978), como también a la intolerancia a la toxicidad por manganeso (Brown y Jones, 1977b). A diferencia de las otras leguminosas de grano, las cepas de rizobios asociadas con la soya tienden a ser más tolerantes al aluminio que la planta (Munns, 1980).

También se ha identificado tolerancia al aluminio en algunos cultivos de batata (*Ipomoea batatas*) (Munn y McCollum, 1976; Tomaf, 1978). Algunas variedades cultivadas en Puerto Rico son relativamente tolerantes a la toxicidad por aluminio y manganeso (Pérez-Escolar, 1977).

El trigo (*Triticum aestivum*) es, probablemente, la especie más estudiada en lo que respecta a la tolerancia a la acidez del suelo. En América Latina es un cultivo importante en las regiones de Oxisoles-Ultisoles, con regímenes de temperatura del suelo isotérmicos o térmicos. Las diferencias entre variedades parecen estar relacionadas con los estados de acidez del suelo donde fueron desarrollados los materiales (Silva, 1976; Foy et al., 1974). Por ejemplo, las bien conocidas variedades de trigo de porte bajo CIMMYT, las cuales fueron seleccionadas en suelos calcáreos del Norte de México, crecieron pobremente

en Oxisoles del Cerrado de Brasil, en comparación con las variedades que fueron desarrolladas en Brasil, a pesar del tipo inferior de planta de estas últimas (Salinas, 1978). La tolerancia a la acidez del suelo en dichos cultivares de trigo está relacionada con una tolerancia conjunta a la toxicidad por aluminio y al bajo nivel de fósforo aprovechable en el suelo (Salinas, 1978; Miranda y Lobato, 1978). Otros estudios también muestran que, en Oxisoles, las variedades de trigo tolerantes al aluminio se comportan mejor en condiciones de altos niveles de saturación de aluminio que las variedades de soya tolerantes al aluminio (Muzilli et al., 1978).

B. Cultivos Perennes y Forestales

El Cuadro 6 enumera algunas de las especies frutales del trópico consideradas como tolerantes a los estreses de los suelos ácidos. Algunas especies como la piña y el marañón son bien conocidas por su adaptación a los suelos ácidos. Al igual que los cultivos anuales alimenticios ciertas especies son afectadas severamente por otros factores limitantes. Por ejemplo, el banano es afectado por enfermedades y altos requerimientos de potasio; los cítricos son menos productivos en regímenes de temperatura isohipertérmicos que en climas fríos; el mango requiere un régimen de humedad del suelo ústico para una productividad alta.

En el Cuadro 7 se presentan algunos cultivos perennes y especies forestales importantes adaptados a los suelos ácidos en los trópicos,

El café arábigo es muy tolerante al aluminio, pero sensible a la toxicidad por manganeso (Abruña et al., 1965). Este cultivo se adapta mejor a un régimen de temperatura del suelo isotérmico y un régimen de humedad del suelo údico. El café robusta se adapta mejor a regímenes isohipertérmicos, pero produce café de menor calidad que el café arábigo.

Entre otros cultivos perennes, la palma de aceite y el caucho están muy bien adaptados a las regiones de Oxisoles - Ultisoles, particularmente aquellas con regímenes údicos isohipertérmicos (Alvim, 1981; Santana et al., 1975). La caña de azúcar por lo general también es tolerante a las condiciones de los suelos ácidos (Abruña y Vicente Chandler, 1967), pero requiere grandes cantidades de nitrógeno y potasio para sostener niveles elevados de producción.

Aunque muchas especies maderables nativas del Amazonas son tolerantes a las condiciones de los suelos ácidos, algunas de las más promisorias son importadas de otras regiones. *Gmelina arborea*, *Pinus caribea*, *Dalbergia nigra* y ciertas especies de *Eucalyptus* han probado estar bien adaptadas a los Oxisoles y Ultisoles de la Amazonía brasilera, sin necesidad de enclavamiento (Alvim, 1981). Otras especies nativas del Amazonas tales como *Bertholettia excelsa*, *Paullinia cupana* y *Guilielma gasipaes* también tienen un potencial comercial significativo.

En la lista anterior no se incluyen varios cultivos tropicales perennes importantes; entre éstos vale la pena mencionar al *Theobroma cacao* y *Leucaena leucocephala*, una especie leguminosa con potencial para pastoreo, ramoneo y leña (National Academy of Sciences, 1977b). Ninguna de estas dos especies es tolerante al aluminio (Alvim, 1981; Hill, 1970). Por consiguiente, no están adaptadas a los suelos ácidos con bajos niveles de insumos. Sin embargo, se están adelantando trabajos en mejoramiento genético por tolerancia al aluminio en ambas especies. En el caso de la leguminosa, la selección de cepas de *Rhizobium* tolerantes a la acidez se considera de igual importancia a la selección de plantas (CIAT, 1979; Munns, 1978).

C. Pastos Tropicales

En Australia y América Latina se han adelantado trabajos extensivos en la selección de especies de gramíneas y leguminosas para pasturas con tolerancia a la acidez del suelo (Andrew y Hegarty, 1969; Andrew y Vanden Berg, 1973; Spain et al., 1975; Andrew, 1976; 1978; Helyar, 1978; CIAT, 1978; 1979, 1980, 1981; Spain, 1979). Una diferencia fundamental del trabajo en los dos continentes es que la toxicidad del aluminio no es frecuente en las regiones de pasturas tropicales de Australia, en tanto que sí lo es en las regiones de pasturas tropicales de América Latina (Sánchez e Isbell, 1979). En Australia tropical, los estreses predominantes en los suelos ácidos incluyen bajos niveles de fósforo, azufre y molibdeno

y en menor grado la toxicidad del manganeso. En América tropical son más importantes la toxicidad del aluminio, la baja disponibilidad de fósforo y la alta fijación de este último.

1. Tolerancia al Aluminio

Un amplio espectro del banco de germoplasma de forrajes del CIAT es tolerante a altos niveles de aluminio intercambiable, sencillamente debido a que gran parte de éste ha sido colectado en las regiones de suelos ácidos e infértiles de América tropical (Schultze-Kraft y Giacometti, 1979). En la Figura 7 se presenta un ejemplo de la tolerancia diferencial al aluminio de cuatro gramíneas tropicales comunes, con base en un estudio en soluciones de cultivo adelantado por Spain (1979).

Incluso *Brachiaria decumbens* mostró una respuesta ligeramente positiva al primer incremento de aluminio. *Panicum maximum* exhibió una alta tolerancia hasta la mitad de la concentración de aluminio tolerada por *Brachiaria decumbens*. En contraste, *Cenchrus ciliaris*, uno de las gramíneas tropicales más ampliamente distribuidos en las áreas ústicas pero no ácidas de Australia, es afectada severamente por el aluminio. Esta excelente gramínea está bien adaptada a los suelos no ácidos, pero para que crezca bien en regiones de Oxisoles - Ultisoles es necesario neutralizar completamente el aluminio intercambiable por medio de prácticas de encalamiento hasta un nivel de pH de 5.5. En el Cuadro 7 se presenta una lista de especies tolerantes.

La Figura 8, adaptada también de Spain (1979), muestra respuestas a la aplicación de cal en un Oxisol de Carimagua, Colombia, con un pH de 4.5 y una saturación de aluminio del 90% antes del encalamiento. Las gramíneas tolerantes a la acidez tales como *Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* y *Panicum maximum* y las leguminosas *Stylosanthes capitata* y *Zornia latifolia*, produjeron su crecimiento máximo a 0 ó 0.5 ton de cal/ha. La tasa de 0.5 ton de cal/ha no alteró el pH del suelo o la saturación de aluminio, pero suministró calcio y magnesio a las plantas. Sus comportamientos son claramente superiores a los de especies sensibles al aluminio, tales como el sorgo y *Centrosema plumieri*, una leguminosa no adaptada a suelos ácidos. También es pertinente indicar que algunas especies tolerantes al aluminio no crecen vigorosamente en suelos ácidos. Este es el caso del pasto pangola (*Digitaria decumbens*), ilustrado en la Figura 8.

2. Niveles Bajos de Fósforo Disponible en el suelo

El fósforo es el insumo individual más costoso requerido para las sabanas de pasturas mejoradas en Oxisoles-Ultisoles (CIAT, 1979). Sin embargo, no es el único nutrimento deficiente en estos suelos, pero su corrección es, por lo general, la más costosa. No es factible establecer o mantener pastos mejorados en estas sabanas sin fertilización con fósforo. Con el fin de incrementar la eficiencia de la fertilización con fósforo, es posible seleccionar plantas que tengan un menor requerimiento de fósforo para máximo crecimiento que aquellas

empleadas actualmente. Afortunadamente, la tolerancia al aluminio y la "tolerancia al bajo nivel de fósforo" ocurren con frecuencia conjuntamente, debido a que ésta última parece estar asociada con la habilidad que tiene la planta para absorber y translocar el fósforo desde la raíz hasta la parte aérea en presencia de niveles altos de aluminio en la solución del suelo y/o en el tejido radical (Salinas 1978).

Varias especies de gramíneas y leguminosas forrajeras promisorias requieren una fracción de los niveles de fósforo disponible en el suelo requeridos por cultivos anuales, y mucho menos que otras especies de pastos. Por ejemplo, en Colombia, el nivel crítico general según pruebas de suelo es de 15 ppm de P determinado por el método de Bray II (Marín, 1977). Los ecotipos promisorios de *Stylosanthes capitata*, *Zornia latifolia* y *Andropogon gayanus* tolerantes al aluminio requieren entre 1/3 - 1/5 de esa cantidad para alcanzar máximos rendimientos. Esta información se presenta en el Cuadro 33 de la sección VI, D.

Debe anotarse que las gramíneas adaptadas tales como *Andropogon gayanus* y *Brachiaria decumbens* requieren niveles críticos más altos de fósforo disponible en el suelo determinados por el método Bray II (5-7 ppm de P) que los requeridos por leguminosas adaptadas tales como *Stylosanthes capitata* y *Zornia latifolia* (3-4 ppm de P) para acercarse a su máximo crecimiento (CIAT, 1979). El punto de vista

comunmente sostenido de que la fertilización de mezclas de gramíneas-leguminosas se debe basar en el requerimiento nutricional más alto de la leguminosa no se aplica a estas especies. Esto ha sido probado en el campo por Spain (1979) quien observó que, además del fósforo, había una mayor necesidad de potasio en las gramíneas que en las leguminosas.

Durante el año de establecimiento, las respuestas de campo mostraron diferencias significativas en los niveles de fertilización con fósforo requeridos para acercarse al máximo crecimiento en un Oxisol con cerca de 1 ppm de P disponible (método de Mehlich 2), antes de las aplicaciones del tratamiento (Fig. 9). *Andropogon gayanus* requirió 50 Kg de P_2O_5 /ha para alcanzar máximos rendimientos, en tanto que *Panicum maximum* requirió 100Kg de P_2O_5 /ha e *Hyparrhenia rufa* requirió 200 o quizás más. Esta última especie, ampliamente difundida en América Latina, se desarrolla pobremente en las regiones de Oxisoles-Ultisoles debido a un requerimiento de fósforo y potasio generalmente mayor y a una menor tolerancia al aluminio que las otras dos (Spain, 1979). Estas diferencias son relativamente significativas a nivel de producción animal. A niveles de insumos en los que otras gramíneas producen buenas ganancias de peso vivo en ganado, *Hyparrhenia rufa* produjo pérdidas severas de peso vivo en Carimagua, Colombia (Paladines y Leal, 1979).

Se podría argüir que el uso de pastos que requieran menor fósforo

podrían proveer insuficiente fósforo para la nutrición animal. No existe evidencia en los trabajos realizados por el CIAT de que esto sea cierto, pero si lo fuera, probablemente sería más económico aplicar al suelo sólo el fertilizante fosforado requerido para el crecimiento máximo de las plantas y suplementar el resto directamente a los animales utilizando sal.

3. Estrés Hídrico

La habilidad para crecer y sobrevivir en los períodos secos de los ambientes ústicos en condiciones de pastoreo es un requisito necesario para las especies forrajeras tolerantes a la acidez, ya que el riego de las pasturas es extremadamente costoso en la mayoría de las regiones de Oxisoles-Ultisoles. Debido a su tolerancia al aluminio, las raíces de las especies forrajeras adaptadas son capaces de penetrar profundamente en el subsuelo ácido y extraer la humedad residual que está disponible. Esto contrasta marcadamente con los cultivos sensibles al aluminio que sufren severamente por estrés hídrico, aún durante períodos secos cortos, debido a que sus raíces están limitadas a la superficie del suelo enclavada (González et al., 1979). Las especies de leguminosas adaptadas son, por lo general, más tolerantes al estrés causado por la sequía que las especies gramíneas. Además, las leguminosas son capaces de mantener un valor nutricional más alto durante los períodos secos que las gramíneas. Por ejemplo, *Zornia latifolia* 728 presentó un 24% de proteína en sus hojas hasta el período seco

de Carimagua, en tanto que las gramíneas acompañantes sólo presentaron cerca de un 5% de proteína (CIAT, 1979).

Entre las gramíneas adaptadas *Andropogon* es más tolerante al estrés por sequía que *Brachiaria decumbens* o *Panicum maximum* (CIAT, 1979); sus hojas pubescentes también permiten que las gotas de rocío permanezcan sobre las hojas más tiempo que en estas dos últimas especies (CIAT, 1979). Es muy común que al caminar por una pastura de *Andropogon* en los Llanos o en la Amazonía aproximadamente a las 10:00 a.m. se humedezcan las botas del pantalón, en tanto que las pasturas de las otras dos especies ya están secas a esta hora.

4. Ataques de Insectos y Enfermedades

La mayoría de las especies de leguminosas adaptadas tienen su centro de origen en América Latina y, por consiguiente, tienen muchos enemigos naturales. La antracnosis, causada por *Colletotrichum gloeosporoides*, es una de las enfermedades más devastadoras de las leguminosas (CIAT, 1977, 1978, 1979). Los barrenadores del tallo del género *Caloptilia* también atacan a varias especies de *Stylosanthes* (CIAT, 1979). Los ataques de miones o salivitas causados por *Deois incompleta* y otras especies han destruido miles de hectáreas de *Brachiaria decumbens* en las regiones údicas de Brasil tropical. La solución a estos problemas es la resistencia varietal puesto que es factible que las aplicaciones de insecticidas o fungicidas a estos pastos sean antieconómicas. La selección por tolerancia a éstos y otros patógenos ha proporcionado ecotipos que combinan la adaptación

a condiciones adversas con la resistencia a patógenos. Ejemplos de éstos hasta la fecha incluyen varios ecotipos de *Andropogon gayanus*, *Stylosanthes capitata* y *Desmodium ovalifolium*. Desafortunadamente, varios ecotipos de *Stylosanthes guianensis*, una leguminosa muy bien adaptada a los factores limitantes de los suelos ácidos, han sucumbido a los ataques de insectos y enfermedades (CIAT, 1978, 1979). Al igual que en otros programas de fitomejoramiento, la búsqueda de nuevos ecotipos que combinen la tolerancia a patógenos con otras características deseables, es una actividad continua.

Es interesante anotar que en las regiones de Oxisoles-Ultisoles, los problemas de la protección de plantas aumentan en importancia después de que se logran aliviar los factores edáficos limitantes mediante la selección de plantas o la fertilización. Esto puede ser una consecuencia de la eliminación de un factor previamente limitante o del desarrollo de un patógeno a medida que se cultivaban por primera vez nuevas plantas en un medio nuevo. Esta observación se aplica tanto a pasturas como a cultivos anuales alimenticios. Sin embargo, la tolerancia a los ataques de enfermedades e insectos varía según las condiciones ecológicas y, por consiguiente, el grado de tolerancia de cada cultivar promisorio se debe validar localmente.

5. Tolerancia a la Quema

Las quemas accidentales son comunes en las regiones de sabana y es posible que las quemas intencionales sean una práctica de manejo

necesaria en casos en los que los pastos se aproximan a la madurez rápidamente y pierden su valor nutricional. Por consiguiente, las especies de pastos adaptadas debenser capaces de retoñar después de la quema. Estudios en Quilichao, Colombia, muestran que *Andropogon gayanus*, *Panicum maximum*, *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria humidicola* retoñan rápidamente luego de la quema (CIAT, 1979). Trabajos posteriores del CIAT muestran que el rebote después de la quema depende mucho de las condiciones de humedad del suelo al momento de la quema. Por ejemplo los *Brachiaria* son muy susceptibles a la quema cuando la superficie del suelo está húmeda.

D. Conclusiones

Existe una amplia base de germoplasma de cultivos anuales, cultivos permanentes, cultivos arbóreos y especies de pastos tolerantes a la acidez y adaptados a las condiciones tropicales de América Latina. Además, la selección en programas de mejoramiento genético puede suministrar variedades tolerantes a la acidez a partir de especies que por lo general son sensibles. Sin embargo, el grado de cuantificación de estas diferencias es limitado. Se necesita una clasificación más sistemática sobre cuáles son los niveles críticos de tolerancia de cada variedad o especie importante. Dicho sistema de clasificación de plantas podría ligarse con los sistemas actuales de clasificación de suelos con el fin de comprarar mejor las características de la planta con los factores edáficos limitantes.

IV. DESARROLLO Y MANTENIMIENTO DE UNA COBERTURA VEGETAL

La elección de sistemas agrícolas es extremadamente variada y muy dependiente de las demandas u oportunidad de mercado, la tradición agrícola y las políticas gubernamentales. Los sistemas agrícolas que prevalecen en regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical se pueden agrupar en cuatro categorías principales : agricultura migratoria (principalmente en zonas de bosque), ganadería extensiva por pastoreo tanto en regiones de bosque como de sabana, sistemas de producción de cultivos permanentes y sistemas de producción intensiva de cultivos anuales. La extensión de los dos últimos es muy limitada. Estos sistemas se describen en una revisión hecha por Sánchez y Cochrane (1980).

Indistintamente del sistema agrícola o la especie de planta empleada, un principio básico de la tecnología de bajos insumos es desarrollar y mantener una cubierta vegetal sobre el suelo durante el mayor tiempo posible, con el fin de disminuir la erosión, la compactación y los riesgos de lixiviación. Los componentes esenciales de dicha tecnología incluyen los métodos de apertura de tierras, las técnicas de establecimiento de cultivos y pasturas, las coberturas orgánicas, el uso de períodos manejados de enrastramiento, cultivos intercalados y sistemas de cultivos múltiples. En esta sección se discuten algunos de los adelantos en el desarrollo de estos componentes

de la tecnología.

A. Métodos de Apertura de Bosques

La selección del método de desmonte es lo primero que se debe hacer y probablemente es el paso más crucial que afecta la productividad futura de los sistemas agrícolas en las zonas de bosques húmedos.

Diversos estudios comparativos realizados en los trópicos húmedos de América Latina confirman que el corte manual y los métodos de quema son superiores a los diferentes tipos de desmonte mecánico, debido al valor de la ceniza como fertilizante y debido a la menor compactación del suelo y desplazamiento de su superficie, en comparación con el desmonte mecanizado.

1. Adiciones de Nutrientes por las Cenizas

El contenido de nutrientes de las cenizas ha sido determinado directamente al quemar un bosque secundario de 17 años de edad, en un Typic Paleudult de Yurimaguas, Perú. Los datos de Seubert et al. (1977) en el Cuadro 9 muestran los efectos benéficos significativos de la ceniza en las propiedades químicas del suelo (Fig. 10), lo cual resultó en mayores rendimientos de una serie de cultivos durante los dos primeros años después del desmonte (Cuadro 10). Hay una variabilidad considerable entre sitios en lo que respecta a la cantidad de ceniza y su composición nutricional, debido a las diferencias en

las propiedades del suelo, a las técnicas de desmonte y a la proporción de biomasa forestal realmente quemada. Silva (1978) estimó que sólo un 20% de la biomasa forestal derribada se convirtió realmente en ceniza después de la quema del bosque virgen en un Oxic Paleudult de la parte sur de Bahía, Brasil. Silva también analizó la composición de la ceniza de partes quemadas de especies forestales individuales y observó rangos amplios de variación (0.8% - 3.4% de N; 0-14 ppm de P; 0.06-4.4 meq de Ca/100 g; 0.11-21.03 meq de Mg/100 g; y 34-345 meq de K/100 g). Esta información sugiere la presencia de ciertas especies que se pueden considerar como acumuladoras de nutrimentos específicos.

Es factible que el valor de la ceniza como fertilizante sea menos importante en suelos con altos niveles de bases. Cordero (1964) observó que los aumentos en la disponibilidad de fósforo y potasio causados por la quema de biomasa de un Entisol con un pH 7 en Santa Cruz, Bolivia, no aumentaron los rendimientos de cultivos. El suelo ya presentaba altos niveles de estos elementos. La información sobre la composición de las cenizas provenientes de diferentes suelos y métodos de desmonte puede por consiguiente, contribuir significativamente al entendimiento de la dinámica del suelo y su manejo posterior.

2. Compactación del Suelo

El uso convencional de "bulldozers" tiene el efecto adverso típico de la compactación del suelo, particularmente en Ultisoles

de textura arenosa. En suelos de éstos en Surinam (Van der Weert, 1974), Perú (Seubert et al. 1977) y Brasil (Silva, 1978) se han registrados disminuciones significativas en las tasas de infiltración, incrementos en la densidad aparente y disminución en la porosidad después del desmonte mecanizado. El Cuadro 11 muestra las disminuciones en la infiltración en tres localidades. El método de corte y quema tuvo un efecto moderado en las tasas de infiltración, pero el uso de bulldozers las disminuyó extremadamente. Las comparaciones entre localidades son difíciles debido a las diferencias en el lapso de tiempo empleado en la medición. El ejemplo de Manaus ilustra la compactación observada en pasturas degradadas, en zonas de la Amazonía Brasileña.

3. Desplazamiento de la Superficie del Suelo

La tercera consideración básica es el grado de arrastre de la superficie del suelo, no por la cuchilla del bulldozer, la cual normalmente se mantiene por encima del suelo, sino por el arrastre de árboles desenraizados y troncos. Aunque no hay datos cuantitativos disponibles, comunmente se observa la remoción de la superficie del suelo de lugares altos y su acumulación en lugares bajos. El mejor rebrote del bosque cerca de hileras de vegetación derrumbada indica que el desplazamiento de la superficie del suelo puede resultar en reducciones significativas del rendimiento (Sánchez, 1976). Por ejemplo, Cal et al. (1975) observó en Nigeria que los rendimientos de maíz disminuyeron en un 50% cuando se removieron 2.5 cm de la capa superficial de un Alfisol. Desafortunadamente, no hay disponibles datos comparables

obtenidos en suelos ácidos de América tropical. Sin embargo, es indudable que las disminuciones en el rendimiento presentadas en el Cuadro 10 están asociadas con el desplazamiento de la capa superficial del suelo.

4. Métodos Alternativos de Desmonte

Los efectos adversos del desmonte con bulldozer generalmente son conocidos por los agricultores y por las organizaciones de desarrollo en zonas de la Amazonía. Los créditos gubernamentales para las operaciones de desmonte mecanizadas o en gran escala se han reducido marcadamente en la Amazonía Brasileña desde 1978. También se está considerando la práctica de destrucción completa del bosque versus su cosecha parcial antes de la quema.

Silva (1978) proporcionó el primer estimado cuantitativo de los posibles beneficios de tal práctica. Comparó los dos extremos : el método de corte y quema y el uso del bulldozer, con tratamientos que incluyen primero la remoción de árboles comercializables seguido por el corte y la quema de los restantes. Todas las ventajas de la quema en la fertilidad del suelo se observaron en este último tratamiento, con diferencias no significativas con el método convencional de corte y quema (Silva, 1978), pero con un valioso aumento en los ingresos. La falta de diferencias probablemente se debe a la proporción pequeña de la biomasa total que realmente se quema. En efecto, muchos agricultores en la Amazonía cosechan primero la madera y algunos de ellos

desarrollan aserraderos rentables en el proceso de desmonte para el establecimiento de pasturas.

Las presiones por abrir tierras nuevas en algunas áreas del Amazonas son tan intensas que ahora es necesario desarrollar una tecnología que minimice los efectos adversos del desmonte en las propiedades del suelo. Hasta ahora no se han realizado investigaciones sistemáticas que comparen las tecnologías de desmonte mecanizado actualmente disponibles. Los bulldozers equipados con una cuchilla "KG" que corta los troncos de los árboles a nivel del suelo podrían causar menos desplazamiento de la superficie del suelo, puesto que el sistema radical permanece en su lugar. Los aditamentos de tractores para el "empuje de árboles" reducen los requerimientos de energía para el desmonte y deben disminuir la compactación por la maquinaria. Una cadena liviana arrastrada por dos bulldozers también puede minimizar la compactación. Con estas tres técnicas, la vegetación derribada puede ser quemada y el material residual puede ser removido por los bulldozers equipados con una "rastra".

Un estudio en gran escala sin repeticiones, en un Typic Acrorthox cerca de Manaus, mostró poca diferencia en las propiedades químicas o físicas del suelo, cuando algunas de las combinaciones mencionadas se compararon con el uso de bulldozer (UEPAE de Manaus, 1979). El tratamiento de corte y quema dio unas propiedades químicas superiores y un mejor crecimiento de pasturas que los tratamientos de desmonte

mecanizado.

Los trabajos en Alfisoles de Nigeria, con propiedades químicas y físicas totalmente diferentes, muestran que el desmonte con bulldozers equipados con cuchillas segadoras seguido por la quema y remoción de residuos con un rastrillo fue el sistema mecanizado menos perjudicial (IICA, 1980).

Un tipo de tecnología de bajos insumos que ha producido pocos resultados satisfactorios es el desmonte parcial de bosques húmedos tropicales. Las franjas se desmontan por medio del método de corte y quema, con el propósito de sembrar cultivos tolerantes a la sombra tales como cacao, o ciertos pastos, o para enriquecer el bosque con especies maderables valiosas. En Manaus, Brasil, varias organizaciones han llevado a cabo experimentos, pero los resultados han sido desalentadores. No hay datos disponibles, pues tales experimentos no han sido publicados. Aparentemente, es difícil proveer suficiente luz solar para el establecimiento vigoroso de las plantas sin eliminar la cobertura de bosque. Sin embargo, con frecuencia se dejan unos pocos árboles sin tocar, especialmente cuando éstos son de valor, o para suministrarle sombra a las pasturas. Hecht (1979) ha identificado varias especies de leguminosas arbustivas y arbóreas a las cuales se les debe permitir retoñar luego del desmonte, debido a su capacidad para proporcionar forrajes para ramoneo por el ganado. Muchos de los fracasos de las operaciones agrícolas en gran escala observados por los autores en los trópicos húmedos, pueden ser atribuidos directa-

mente a los métodos inapropiados de desmonte. Se necesita investigación sobre los métodos alternativos de desmonte mecanizado que incluyan la quema.

B. Dinámica del Suelo Después del Desmonte de Bosques Húmedos Tropicales

Cuando se demonta y quema un bosque tropical, generalmente ocurren varios cambios en las propiedades del suelo durante el primer año : por volatilización durante la quema ocurren grandes pérdidas de nitrógeno y azufre de la biomasa; la materia orgánica del suelo disminuye con el tiempo hasta llegar a un nuevo equilibrio; el pH de los suelos ácidos aumenta; los niveles de saturación de aluminio disminuyen; las bases intercambiables y los niveles de fósforo disponible aumentan; y las temperaturas de la superficie del suelo aumentan (Sánchez, 1979). La siguiente discusión está basada en una revisión reciente del tema, realizada por el autor principal (Sánchez, 1979).

La mayoría de los datos disponibles están basados en muestreos hechos en sitios cercanos de edad conocida, luego del desmonte simultáneo. Esta técnica combina las dimensiones de espacio y tiempo y aumenta la variabilidad entre sitios que ya es considerable. Afortunadamente, existen cinco estudios en los cuales se investigaron en el tiempo los cambios en las propiedades del suelo en regiones húmedas de América tropical : Yurimaguas, Perú; Manaus, Belém y Barroilandia, Brasil; y Carare-Opón, Colombia. Sin embargo, la mayoría de ellos se limitan a lo que sucede durante el primer año, pero uno de ellos

cubre un período de 8 años. Sin embargo, los estudios ilustran las diferencias que ocurren entre sitios en función del tiempo.

1. Materia Orgánica del Suelo

Salas y Folster (1976) estimaron que, cuando un bosque virgen en un Aeric Ochraquox en el Valle del Magdalena Medio de Colombia fue cortado y quemado se perdieron 25 ton de C/ha y 673 Kg de N/ha. Estas cifras se dedujeron por medio de la medición de los cambios ocurridos en la biomasa antes y después de la quema, pero antes de presentarse las primeras lluvias. Estas pérdidas sólo responden por 11-16% del carbono total y cerca de 20% del nitrógeno total en el ecosistema (Salas, 1978). Consecuentemente, es necesario esclarecer las afirmaciones de que la mayoría del carbono y el nitrógeno presente en la vegetación es volatilizado en la quema. Otro factor desconocido es si una proporción de los elementos volatilizados regresa o no a zonas cercanas por el lavado de las lluvias.

Salas (1978) también determinó la influencia de la quema sobre la capa delgada rica en materia orgánica, constituida por la interfase de capa superior de suelo-humus. La relación C/N de este material aumentó de 8 a 46 en 5 meses, lo cual indica que las pérdidas por volatilización eran ricas en nitrógeno.

La literatura tiene información contrastante acerca de las pérdidas de materia orgánica del suelo cuando empieza la fase de cultivo. En suelos con contenidos iniciales de materia orgánica más altos ocurrirán

pérdidas mayores (Sánchez, 1976). Sin embargo, este efecto es atenuado por la presencia de arcillas en la capa superficial del suelo. Turenne (1969, 1977) encontró una relación inversa entre las pérdidas de carbono orgánico y los contenidos de arcilla en Oxisoles de la Guyana Francesa.

Otro efecto supuestamente adverso de la quema es una disminución en la actividad microbiológica del suelo. Un estudio realizado por Silva (1978) en el sur de Bahía informa sobre diferencias no significativas causadas por varios grados de quema en la flora fungosa, pero sí disminuciones en las poblaciones de bacterias y actinomicetos durante los primeros 30 días después de una quema convencional. La Figura 11 muestra la tendencia en la actividad de la descomposición de la celulosa con el tiempo. La quema realmente tuvo un efecto estimulante en la microflora debido probablemente al incremento en fósforo y otros nutrientes, y las mayores temperaturas del suelo por la exposición de la superficie del mismo a la luz solar directa. Tal efecto no se observó en el desmonte con bulldozer, probablemente debido al desplazamiento de la capa superficial del suelo y a la compactación. El efecto de la esterilización parcial por la quema convencional puede explicar la menor actividad microbiológica observada durante los primeros 25 días después de la quema.

En la Figura 12 se ilustra la dinámica del carbono orgánico durante los primeros 4 años de cultivo continuo de arroz secano-maíz-soya en un Ultisol de Yurimaguas, Perú, sin fertilización o encalamiento.

Hubo un aumento real en los contenidos de carbono orgánico un mes después de la quema, probablemente como resultado de una contaminación por cenizas. A este aumento le siguió un período estable durante 5 meses, luego se observó una disminución marcada después de la primera cosecha de arroz y, finalmente, se llegó a un equilibrio hacia el final del primer año. La tasa de descomposición anual durante el primer año fue del orden del 30%, pero se llegó a un nuevo equilibrio durante el segundo de cultivo (Villachica, 1978).

Esta alta tasa de descomposición resultó en un aumento marcado en el nivel de nitrógeno orgánico en la capa superficial del suelo durante los primeros 6 meses en Yurimaguas (80 Kg de N/ha en los 50 cm superiores del suelo), el cual desapareció rápidamente debido a la lixiviación del tiempo y/o a la extracción por el cultivo (Seubert et al., 1977). Esta abundancia de nitrógeno probablemente contribuye al crecimiento prospero del primer cultivo luego de la quema.

2. Aumentos Iniciales en la Disponibilidad de Nutrimientos

El Cuadro 12 resume los cambios en las propiedades de la capa superficial del suelo antes del desmonte y después de la quema observados en varios estudios de tiempo correctamente muestreados. Este cuadro muestra las tendencias generales y sus desviaciones. Los valores del pH del suelo aumentan después de la quema, pero no hasta su valor neutro. Los niveles de Ca + Mg intercambiables se doblaron, triplicaron o cuadruplicaron, pero entre los dos sitios de Yurimaguas hubo una variabilidad considerable entre desmontes cercanos en el mismo

suelo. Esta diferencia en particular fue atribuída a un nivel de bases inicialmente mayor en el sitio II y una mejor calidad de la quema que en el sitio I. El potasio intercambiable también aumentó, pero el efecto no duró debido a la lixiviación rápida. Esto probablemente explica por qué no hubo aumentos en las localidades de Yurimaguas Chacra II y Belém, los cuales fueron muestreados a los 3 y 12 meses después de la quema. El aluminio intercambiable disminuyó en cantidades proporcionales a los aumentos en Ca + Mg, sugiriendo un efecto directo del encalamiento. Una excepción a esta afirmación ocurrió en la localidad al sur de Bahía, la cual presentó contenidos de aluminio intercambiable relativamente bajos. La saturación de aluminio disminuyó en todos, excepto en un caso, a niveles por debajo de los que se consideran como críticos para cultivos tales como el maíz (60%). El fósforo disponible también aumentó con la quema, sobrepasando el nivel crítico generalmente aceptado para cultivos anuales (10 - 15 ppm de P., determinado por el método Olsen modificado, Bray II o Mehlich). Indistintamente de las diferencias entre las localidades, no hay duda de que la fertilidad de los suelos ácidos mejoró considerablemente después de la quema.

3. Patrón de Disminución de la Fertilidad

Los efectos positivos mencionados con anterioridad comienzan a invertirse con el tiempo. La Figura 10 ilustra los cambios ocurridos en los primeros 10 meses después del desmonte en Yurimaguas fertilización. Silva (1978) informó sobre resultados casi idénticos

al sur de Bahía, al otro lado del continente. Los primeros elementos que se agotan son el nitrógeno inorgánico (no ilustrado) y el potasio, en tanto que los demás presentan una disminución más lenta. La Figura 12 muestra los cambios que ocurren en las propiedades de la capa superior del suelo durante los primeros 4 años en Yurimaguas. Después del primer año se alcanzaron valores de equilibrio para el pH y el carbono orgánico. Al cabo de un año, el aluminio intercambiable comenzó a aumentar después de su disminución inicial, hasta alcanzar los niveles que tenía antes del desmonte. Esto se le atribuye a la tasa rápida de descomposición de la materia orgánica durante el primer año, la cual liberó iones H^+ y compuestos de aluminio ligados a la materia orgánica hacia la solución del suelo. A su vez, éste liberó iones Al^{3+} de los minerales presentes en la arcilla (Villachica, 1978). Por consiguiente, el efecto residual del "encalamiento" por efecto de la ceniza duró corto tiempo. Los aumentos en el nivel de calcio intercambiable permanecieron relativamente estables con el tiempo. El magnesio y el potasio intercambiables disminuyeron después de 6 meses de cultivo. Los niveles de fósforo disponible permanecieron cercanos al nivel crítico de 15 ppm de P (Olsen modificado) en este ensayo particular.

Los datos sobre el comportamiento de los cultivos (Villachica, 1978; Sánchez, 1979) muestran que el nitrógeno y el potasio se tornaron deficientes 6 meses después del desmonte. El aluminio llegó a niveles tóxicos para el maíz a los 10 meses después del desmonte. En ese

momento, el fósforo, el magnesio, el cobre y el boro se tornaron deficientes y los rendimientos sin fertilización se aproximaron a cero. Cuando se aplicó potasio, ocurrió un desbalance en la relación K/Mg, lo cual exigió aplicaciones adicionales de magnesio. El zinc se aproximó a niveles de deficiencia hacia el final del segundo año y las deficiencias de azufre y molibdeno se observaron esporádicamente (Villachica, 1978; Sánchez, 1979). Los resultados obtenidos en Yurimaguas indican que la mayoría de los cambios rápidos ocurren durante los dos primeros años después del desmonte, tiempo después del cual se establece un equilibrio.

C. Preparación del Suelo y Establecimiento de Plantas en
Bosques Húmedos

En los desmontes tradicionales mediante corte y quema, la preparación del suelo generalmente se limita a la remoción de algunos troncos destinados para leña o carbón de leña. Las primeras siembras se hacen cavando huecos con una vara puntiaguda llamada "espeque" o "taparco" y después esparciendo las semillas o simplemente enterrando las estacas de yuca o los rizomas del plátano. Estos sistemas de labranza cero protegen el suelo de la erosión por la existencia de una masa de troncos, ramas y numerosos tocones de árboles y una capa compuesta por ceniza y material vegetal no quemado. Como para la primera siembra rara vez se requieren fertilizantes, hay poca necesidad de labrar el suelo.

Los ensayos realizados en Yurimaguas, Perú, no mostraron diferencias significativas en los rendimientos de arroz secano al utilizar o el sistema de siembra de "tacarpo" sin labranza o la preparación por fanguero seguida por la siembra en hileras, después del desmonte de un bosque húmedo mediante el método de corte y quema (Sánchez y Nureña, 1972). Sin embargo, las distancias entre plantas tuvieron un efecto marcado en los rendimientos. El Cuadro 8 muestra que la disminución de la distancia entre los huecos hechos con el "tacarpo" del patrón convencional de 50 cm x 50 cm a 25 cm x 25 cm, aumentó el rendimiento de arroz. La incidencia de malezas disminuyó considerablemente.

La disminución de las distancias de siembra más un cambio de la variedad tradicional de porte alto, "Carolino", dió como resultado un aumento del 76% del rendimiento (de 0.95 ton/ha a 1.67 ton/ha) en ensayos a nivel de agricultor en la región de Yurimaguas (Donovan, 1973). Esta tecnología sencilla de bajos insumos ha mejorado el sistema tradicional de agricultura migratoria. Sin embargo, para cambiar en esta región del cultivo migratorio al cultivo continuo, definitivamente se requiere fertilización (Sánchez, 1977).

En el Amazonas es común sembrar especies de pastos en tierras desmontadas por el método de corte y quema. La alta fertilidad inicial favorece el establecimiento rápido de pastos y el desarrollo de la cobertura del suelo. Toledo y Morales (1979) informaron del establecimiento exitoso de pastos en Ultisoles de Pucallpa, Perú,

con *Brachiaria decumbens* y *Panicum maximum*. También indicaron que las asociaciones de leguminosas y gramíneas pueden ser difíciles de establecer, debido a que las especies más agresivas tienden a dominar. Para evitar esta dificultad se recomienda sembrar cada especie en hileras simples o dobles.

Para muchas de las especies de pastos adaptadas a las condiciones de los suelos ácidos se obtiene un mejor establecimiento cuando las semillas encuentran un suelo acanalado en lugar de un suelo pulverizado (Spain, 1979). Esto se le atribuye a la necesidad que tienen las semillas pequeñas de pastos de ser cubiertas y evitar así su desecación durante la germinación. La siembra a una profundidad de 1-2 cm es factible que retrase el establecimiento o lo evite.

Debido al alto nivel inicial de fertilidad de la capa superficial del suelo después de la quema el desarrollo de la cobertura vegetal después del desmonte mediante el corte y la quema rara vez constituye un problema en los trópicos húmedos. El aspecto crítico es la naturaleza de dicha cobertura. Con un buen manejo, estará constituida por cultivos vigorosos o pastos de crecimiento rápido; con un manejo pobre o en condiciones climáticas adversas, el rebrote de malezas o de bosque constituirán los principales componentes de la cobertura. En cualquier caso, es probable que el suelo quede protegido de los riesgos de la erosión.

Sin embargo, con el desmonte mecanizado la situación es totalmente diferente. La ausencia de la quema mantiene el estado ácido e infértil original del suelo (Fig. 10) y puede esperarse algún grado de compactación. La labranza del suelo usualmente se requiere para corregir la compactación y para incorporar cantidades moderadas de fertilizante y cal que pueda necesitar el primer cultivo de pastos. Aunque es probable que la competencia de las malezas sea menor con el desmonte por corte y quema que con bulldozer.

D. Métodos de Desmonte en las Sabanas

La ausencia de una cobertura cerrada de árboles en las regiones de sabana proporciona una amplia gama de alternativas para transformar la sabana nativa en sistemas de producción agrícola. A diferencia de los bosques húmedos, en la sabana nativa existe un sistema significativo de producción - - ganadería extensiva en pastoreo con un manejo del suelo prácticamente nulo. La vegetación de sabana nativa está lejos de ser uniforme. En el Cerrado de Brasil se han reconocido cinco clases fisionómicas :

1. "Campo Limpo" : (campo limpio) una cubierta continua de pastos sin vegetación arbórea; una sabana sin árboles.
2. "Campo Sujo" : (campo sucio) una cubierta continua de pastos continuos, con arbustos pequeños ampliamente dispersos.

3. "Campo Cerrado" : una cubierta continua de pastos bajo una cubierta arbórea discontinua y lo suficientemente dispersa como para transitar en vehículo por la sabana.
4. "Cerrado" : una sabana constituída por dos cubiertas vegetales por la cual es imposible transitar en vehículo.
5. "Cerradão" : una cubierta dominante y casi cerrada de árboles altos de la misma especie. bajo la cual existe una cubierta discontinua de pastos.

Estas clases fisonómicas están relacionadas con los parámetros de fertilidad de la capa superior del suelo en áreas bien drenadas (Lopes y Cox, 1977b). Las sabanas sin árboles también se presentan en suelos superficiales y en áreas pobremente drenadas, aunque con una composición de especies diferentes en este último caso. Extensas áreas de los Llanos Orientales de Colombia pertenecen al tipo campo limpo.

El desmonte y las técnicas de establecimiento de cultivos están relacionadas con los tipos fisionómicos descritos anteriormente. Duque et al. (1980) describieron las diferentes técnicas del desmonte practicadas en el Cerrado del Brasil para áreas que se van a dedicar a la producción de cultivos o de pastos mejorados. Para las

de campo limpo y campo sujo, la técnica tradicional incluye la quema de la sabana nativa, la remoción manual de los arbustos existentes y el arado del terreno. Para *campo cerrado*, *cerrado* y *cerradão*, el procedimiento usual consiste en tumbar la vegetación arbórea con dos bulldozers que tiran una cadena pesada de 25 m de longitud. Luego, una tercera máquina amontona los residuos maderables en hileras a lo largo del contorno, lo cual proporciona alguna protección contra la erosión. Parte de este material se remueve gradualmente para la producción de carbón de leña. Las zonas entre las hileras se queman para eliminar la cubierta de pasto.

Los efectos de las prácticas de desmonte en sabanas no están bien documentados, pero parecen ser menos marcados que aquellos indicados para los bosques húmedos. No se ha medido ni la cantidad ni la composición de la ceniza producida por la quema anual de las sabanas nativas en Oxisoles, pero debido al menor volúmen de biomasa, se estima que la cantidad de ceniza es sólo una fracción de la producida después de la quema de los bosques húmedos. Por consiguiente, los cambios en las propiedades químicas del suelo por el desmonte quizás son menores. El desplazamiento de la capa superior del suelo debido al desmonte con bulldozer es, también, menos pronunciado, debido a la baja densidad y al tamaño generalmente menor de la vegetación arbórea. A diferencia de los bosques húmedos donde el reciclaje mineral ha concentrado nutrimentos en una capa superior del suelo rica en materia

orgánica, en las sabanas, la distribución de materia orgánica y nutrientes es más uniforme con la profundidad (Sánchez, 1976). Por consiguiente, el desplazamiento del suelo superficial causará un daño menor en las sabanas de Oxisoles profundos y en gran medida uniformes que en Ultisoles y Oxisoles con vegetación de bosque húmedo.

E. Establecimiento de Cultivos y Pastos en las Sabanas

En Oxisoles del Cerrado, el implemento de labranza preferido para el establecimiento de cultivos, es el rastrillo de discos. Duque et al. (1980) recomiendan evitar el uso de arados de vertederas y de rastrillos profundos ya que causan compactación. Los fragmentos de raíces se deben recoger después de cada rastrillada durante el primer y segundo año del desmonte. Generalmente se realiza una segunda operación, ya sea con el rastrillo o el arado rotatorio, para incorporar la cal y los fertilizantes aplicados al voleo. La siembra de arroz de secano, soya, maíz y otros cultivos generalmente se realiza con sembradoras de grano equipadas con aditamentos para aplicar fertilizantes en bandas.

En ciertos Oxisoles y Ultisoles de las regiones de sabana, en donde se cultiva extensivamente maní y sorgo, es común observar que se realizan operaciones de labranza excesivamente profundas y frecuentes. Estas prácticas dan como resultado suelos extremadamente pulverizados, que se lavan fácilmente durante lluvias intensas. Algunas de estas regiones se riegan mediante sistemas con pivote central, que con fre-

cuencia son mal manejados. Frecuentemente, estas tecnologías tienen un efecto claramente adverso en las propiedades del suelo.

Los métodos convencionales de establecimiento de pastos en las regiones de sabana, normalmente incluyen uno o dos pases de rastrillo de discos, seguidos por la siembra con una sembradora de grano equipada con aditamentos para aplicar fertilizantes (Spain, 1979). Estas operaciones se efectúan durante la época lluviosa, pero su costo generalmente es alto (CIAT, 1979).

Indistintamente de la calidad de la labranza, el suelo queda expuesto durante un período de tiempo considerable hasta que la cubierta del cultivo o del pasto se haya establecido. Este período crítico coincide con el inicio de la época de lluvias cuando ocurren precipitaciones altas. Aunque los Oxisoles se consideran entre los suelos menos susceptibles a la erosión en el mundo (El Swaify, 1977), la erosión laminar es un factor limitante importante en las sabanas. Dada la distribución relativamente uniforme de la materia orgánica y los nutrimentos en muchos Oxisoles de sabana, se ha sostenido que la erosión laminar no es un limitante importante. Este argumento pierde su validez cuando se incorpora fósforo y cal a la capa superficial del suelo. Además, algunos Oxisoles tienen epipedones úmbricos, con contenidos de carbono orgánico mayores que en los del horizonte óxico inferior. Este también es el caso de muchos Ultisoles de sabana. En dichos casos, la erosión puede disminuir significativamente la

capacidad efectiva de intercambio catiónico, aumentando así las pérdidas potenciales por lixiviación.

A fin de reducir costos y riesgos por erosión, se están desarrollando técnicas de bajos insumos para la preparación del suelo. En esta sección se describen cuatro técnicas : la introducción de pastos mejorados en sabana nativa, su reemplazo gradual, métodos de densidad baja para el establecimiento de pastos y la siembra en relevo de cultivos - pastos.

1. Mejoramiento de la Sabana Nativa

A diferencia de los bosques húmedos , donde el desmonte parcial no es promisorio, el mejoramiento gradual de la sabana nativa parece promisorio. Sin embargo, la siembra de especies de pastos en una sabana nativa sin perturbar generalmente no es exitosa (Spain, 1979). Es necesario algún grado de perturbación del suelo para que las semillas pequeñas de pastos puedan tener contacto suficiente con la humedad para su germinación. El rastrillado ligero o la siembra de cespedones en hileras distanciadas a 50 cm han permitido el establecimiento exitoso de leguminosas tolerantes a la acidez en sabanas de *campo limpo* del Cerrado de Brasil y el mejoramiento de la calidad nutricional de la pastura (CIAT, 1980). Después de un año de la rastrillada y siembra de cespedones, las especies de leguminosas mejoradas, con un contenido de proteína del 14%, se lograron establecer en la sabana nativa, que solamente contenía un 4% de proteína (CIAT, 1980).

Se establecieron pasturas de gramíneas - leguminosas en franjas de 60 cm de ancho, preparadas con rastillo de dientes o cultivadoras a una profundidad de 12 cm, seguido por aplicaciones de fósforo y potasio. El área entre franjas de aproximadamente 2.5 m de ancho recibió cuatro niveles de control de la vegetación de sabana nativa. Varias gramíneas leguminosas fueron capaces de invadir y desplazar gradualmente las franjas de sabana nativa. Las especies más exitosas fueron las leguminosas *Desmodium ovalifolium* y *Pueraria phaseoloides* y a las gramíneas rastreras *Brachiaria himidicola* y *Brachiaria decumbens*. El Cuadro 14 resume los resultados. El trabajo de Spain muestra que la sabana nativa puede ser reemplazada gradualmente por dichas siembras en franjas, a un costo mucho menor y limitando los riesgos de erosión a una fracción de los terrenos.

3. Siembras a Baja Densidad

En sabanas de Oxisoles, el crecimiento de las malezas después de la preparación del suelo es normalmente lento, siempre y cuando no se aplique cal o fertilizante, debido a la baja fertilidad natural del suelo. Aprovechando esta situación Spain (1979) desarrolló un sistema de siembra a baja densidad, con ahorros considerables en los costos de semilla y aplicaciones iniciales de fertilizantes. Después de preparar el terreno con uno o dos pases de rastrillo, las semillas de gramíneas y/o leguminosas se sembraron en huecos espaciados a 3 m, dando una población de 1000 plantas/ha durante la época lluviosa.

Las plantas recibieron una alta tasa de fósforo y potasio en forma localizada, pero con base en unidades de área, las tasas más altas que se aplicaron fueron de 9 Kg de P_2O_5 /ha y 1.5 Kg de K_2O /ha. Un hombre equipado con una pala puede sembrar y fertilizar una hectárea en un día (Spain, 1979).

Estas plantas crecen vigorosamente durante la época lluviosa debido al alto nivel de fertilidad del suelo y a la ausencia de competencia por parte de las malezas o por plantas de la misma especie. Las especies estoloníferas cubren el terreno en 8 meses, al comienzo de la siguiente época lluviosa (CIAT, 1979). Las gramíneas tales como *Andropogon gayanus* y *Panicum maximum* produjeron semilla al final de la época lluviosa. En Carimagua, las semillas se alinearon por sí mismas en los surcos dejados por la rastra de discos y germinaron con las primeras lluvias, creciendo primero que las malezas. Las nuevas plántulas tuvieron que ser fertilizadas poco tiempo después de su emergencia o de lo contrario habrían muerto debido a deficiencias agudas de fósforo y potasio. Con dicho sistema, las pasturas en Carimagua estuvieron listas para su pastoreo a los 9 meses después de la siembra, lo cual se hace aproximadamente 3 meses más tarde que con la preparación convencional del suelo. Los detalles se explican más a fondo en los informes realizados por Spain (1979) y el CIAT (1978, 1979, 1980). Aunque este sistema no reduce los requerimientos de fertilizantes en comparación con las siembras convencionales, los costos de semilla se reducen considerablemente (de US \$34 a \$3/ha; CIAT, 1979). Como

la semilla de pastos mejorados es, por lo general, escasa, el uso de propagación vegetativa es una ventaja adicional.

4. El Uso de Cultivos como Precursores del Establecimiento de Pastos

El sistema de baja densidad descrito anteriormente es factible que no resulte exitoso en áreas de sabana que han sido previamente fertilizadas o en áreas de bosques húmedos recientemente desmontadas, donde ocurre un rebrote vigoroso de malezas y bosque. En muchas de estas áreas, una alternativa aplicable es la de sembrar cultivos como precursores del establecimiento de pasturas usando las prácticas de preparación y fertilización requeridas por los cultivos, pero intercalando especies de pastos, de tal forma que, cuando los cultivos sean cosechados, la pastura ya esté establecida. (Kornelius et al, 1979; Toledo y Morales, 1979). En efecto, los costos del establecimiento de una pastura son en gran medida pagados por el cultivo comercial.

Los resultados obtenidos en un Orthoxic Palehumult en Quilichao, Colombia, presentados en el Cuadro 15, describen algunas de las interrelaciones involucradas. Al sembrar simultáneamente yuca y *Stylosanthes guianensis*, los rendimientos de yuca disminuyeron ligeramente y la producción de *Stylosanthes* se redujo a la mitad, pero la pastura de éste último estuvo lista para el pastoreo después de la cosecha de la yuca. Cuando la yuca se intercaló con una mezcla de *Brachiaria decumbens* y *S. guianensis*, los rendimientos del cultivo fueron afec-

tados adversamente por el crecimiento vigoroso de la gramínea. Aunque los rendimientos totales relativos fueron idénticos a los del caso anterior, esta combinación disminuyó severamente los rendimientos de yuca y, por consiguiente, no es promisoría.

Cuando se emplea un cultivo de ciclo corto, los resultados son diferentes. El Cuadro 15 también muestra las mismas especies de pastos sembradas al mismo tiempo con *Phaseolus vulgaris*. Los rendimientos de frijol no fueron afectados por la presencia ni de la leguminosa sola ni de la mezcla de gramínea-leguminosa, pero el crecimiento de la pastura se retrasó por la presencia del cultivo de frijol. Sin embargo, la pastura ya se había establecido para el momento de la cosecha del frijol.

La siembra intercalada de pastos y cultivos es muy específica para una localidad y depende del clima. Los sistemas reales que se vayan a utilizar se deben validar a nivel local, particularmente en términos de tasas relativas de siembra, espaciamiento entre hileras, variedades del cultivo y niveles de fertilidad. En esta misma localidad de Colombia fracasó el primer experimento de arroz de secano-pastos, debido a que el crecimiento del arroz fue tan vigoroso que los pastos no pudieron competir. Un segundo ensayo con diferentes fechas relativas de siembra y distancias de siembra produjo una excelente asociación de arroz de secano de porte bajo con *Brachiaria decumbens* y *Desmodium ovalifolium* (CIAT, 1979).

Es probable que las pasturas establecidas en esta forma gocen de un nivel inicial y residual de fertilidad del suelo más alto que las pasturas establecidas en la forma convencional. Si se manejan conjuntamente con otras pasturas establecidas convencionalmente, pueden servir como fuentes de proteína o energía para el hato de ganado.

F. Mantenimiento de Pasturas Establecidas

Después de que la pastura se haya establecido, el manejo se concentra en el mantenimiento de su productividad y composición botánica inicial, mediante la manipulación de la carga animal, la presión del pastoreo, la fertilización y el control de malezas. Desafortunadamente, la mayor parte de la información existente en regiones de Oxisoles-Ultisoles se limita a las cargas animales y presión de pastoreo, con poca experiencia en dosis de fertilización de mantenimiento y control de malezas. Generalmente se cree que las dosis de fertilización de mantenimiento debería ser menos de la mitad que las dosis de establecimiento de todos los nutrimentos aplicados. Las pruebas de suelos y los ensayos de campo pueden identificar las dosis más económicas y si su frecuencia de aplicación debe ser cada 1 ó 2 años. Estas técnicas también identificarían deficiencias o desequilibrios nutricionales que surgen con el tiempo. Desafortunadamente, son muy escasos los servicios de análisis de suelos para la fertilización de mantenimiento de pasturas en América tropical.

La degradación de pasturas en el Amazonas ha recibido atención considerable. Según Hecht (1979), la mayoría de las pasturas de *Panicum maximum* en la amazonía brasilera se encuentran en algún estado de degradación. En el área de Paragominas en el Estado de Pará, Hecht (1981) informa que aproximadamente un 70% de las ganaderías dejaron de funcionar debido a la degradación de sus pasturas. Las principales causas de la degradación incluyen el uso de especies de gramíneas con requerimientos nutricionales relativamente altos, la no aplicación de fertilizantes, la no utilización de leguminosas y el uso frecuente de cargas animales excesivamente altas. Los costos del control del rebrote del bosque se tornan muy altos cuando disminuye la población de *Panicum maximum*; posteriormente, los campos se transforman gradualmente en un bosque secundario.

Serrao y sus colaboradores (1979) han encontrado que la deficiencia de fósforo es el factor limitante que pone este proceso en marcha. La disponibilidad de fósforo fue alta inmediatamente después de quemar el bosque, permaneció por encima del nivel crítico hasta por 4 años y luego disminuyó. La corrección de este problema es relativamente sencilla. Serrao et al. (1979) recomendaron cortar los rebrotes de bosque con machete y quemar el campo, y luego aplicar al voleo 50 Kg de P_2O_5 /ha, la mitad como superfosfato simple y la otra mitad como roca fosfatada. En estas condiciones, la población de *Panicum maximum* aumentó entre 25-90%. La siembra de semillas de leguminosas al voleo se está incorporando al sistema.

Con el tiempo, es probable que el potasio, el azufre y otros nutrientes también puedan volverse limitantes. El análisis frecuente de las propiedades del suelo es esencial para identificar estas limitantes y corregirlas rápidamente. El uso de especies bien adaptadas que sean más tolerantes a la toxicidad del aluminio y a los niveles bajos de fósforo disponible también puede mejorar este sistema en particular.

Las gramíneas *Brachiaria humidicola* y *Andropogon gayanus* y la leguminosa *Desmodium ovalifolium* son más promisorias para estas áreas que *Panicum maximum*.

Hutton (1979) sostiene que la razón esencial de la degradación de las pasturas en regiones de Oxisoles-Ultisoles de América Latina es la falta de mantenimiento de la fertilidad del suelo. Este es un argumento correcto y enfatiza la necesidad de establecer niveles críticos por pruebas de suelo o por análisis de tejidos, particularmente de fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, boro, cobre y molibdeno, para las especies más importantes cultivadas en esta región. La actual falta de dicha información es el mayor factor limitante que impide el mantenimiento de pasturas productivas en la región.

G. Coberturas, Abonos Verdes y Enrastrajamientos

Manejados

En los sistemas de producción de cultivos, la mejor cubierta de protección del suelo se puede obtener mediante el uso de coberturas y abonos verdes. La posibilidad de emplear enrastrajamientos manejados,

en contraposición con el enrastramiento con bosque típico secundario también puede mejorar la protección del suelo.

1. El Uso de Coberturas

Un componente principal de la tecnología de bajos insumos en la región de bosques subhúmedos (ústicos) de Africa Occidental es el empleo de residuos de cosecha como coberturas para mantener las propiedades físicas del suelo (Lal, 1975). El International Institute for Tropical Agriculture (IITA) en Nigeria ha obtenido resultados notables que muestran las ventajas del empleo de coberturas para una producción sostenida de cultivos. Sin embargo, la mayor parte de este trabajo ha sido realizado en Plinthic y Oxíc Haplustalfs caracterizados por una capa superficial arenosa y cascajosa seguida por subsuelos arcillosos y cascajosos que con frecuencia presentan plintita blanda. A diferencia de muchos Oxisoles y Ultisoles de América tropical, los suelos dominantes de la región de bosque de Africa Occidental tienen limitantes físicos más agudos que los químicos.

La escasa investigación sobre el empleo de coberturas en regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical ha proporcionado resultados menos positivos que aquellos obtenidos en Africa Occidental. El uso de una cobertura de *Melinis minutiflora* de 10 cm de espesor en cultivos de maíz en Oxisoles del Cerrado de Brasil sólo dio ligeros aumentos en los rendimientos (Bandy 1976; NCSU, 1976). El Cuadro 16 muestra los resultados obtenidos durante la época lluviosa, la cual incluyó

un período considerable de estrés por sequía al aproximarse la época de espigamiento. El empleo de coberturas disminuyó las temperaturas de la capa superior del suelo en 2-3°C, disminuyó las pérdidas por evaporación en 4-7 mm diarios durante el período de estrés por agua y redujo la tensión hídrica en la planta según lo evidenció un menor potencial hídrico foliar (Bandy, 1976). Sin embargo, el rendimiento promedio resultante fue sólo un 6% más alto con cobertura que sin ella. El experimento continuó durante la época seca, con un patrón de riego que simuló los períodos de estrés hídrico observados durante la época lluviosa anterior. También se incluyó un tratamiento de cobertura del suelo con plástico negro. Los rendimientos de maíz fueron similares sin cobertura y con cobertura de *Melinis minutiflora*, pero se obtuvo un rendimiento significativamente mayor con la cobertura de plástico negro (Cuadro 16). Esto se le atribuyó a un desarrollo radical profundo y vigoroso, asociado con mayores temperaturas del suelo causadas por la cobertura de plásticos durante la época fría y seca en Brasilia (Bandy, 1976; NCSU, 1976). Consecuentemente, los beneficios obtenidos con una cobertura de gramínea no fueron suficientemente llamativos para ser recomendada como una práctica. La cobertura de plástico negro es quizás muy costosa como para justificar su uso.

El empleo de coberturas de *Panicum maximum* ha sido evaluado extensamente en Typic Paleudults en Yurimaguas, Perú. Los efectos globales en los rendimientos del cultivo resumidos en el Cuadro 17 no son claros. Valverde y Bandy (1981) indican que el empleo de coberturas

es casi siempre adverso en arroz de secano puesto que las plantas permanecen más verdes hacia la madurez y están sujetas a mayores ataques por hongos. El empleo de coberturas es especialmente ventajoso para el maíz cuando se presenta un estrés severo por sequía. Como el maíz se siembra durante la época más seca del año, está sujeto a un mayor estrés por sequía que el arroz. Por consiguiente, las diferencias encontradas también están relacionadas con la cantidad de lluvia precipitada durante el ciclo de cultivo. No se observaron tendencias globales sobre el efecto del empleo de coberturas del suelo en las tres leguminosas de grano incluídas en el estudio.

La mayoría de las comparaciones resumidas en el Cuadro 17, como también los resultados obtenidos en Brasilia (Cuadro 16), se realizaron a un nivel de fertilización generalmente alto. Un estudio realizado por Wade (1978) en Yurimaguas a niveles menores de fertilización mostró un efecto definitivamente positivo del empleo de coberturas del suelo en los rendimientos de cultivos. El Cuadro 18 muestra los rendimientos relativos de cinco cultivos consecutivos, sin cobertura o con coberturas de la gramínea *Panicum maximum* o la leguminosa *Pueraria phaseoloides*. Estos tratamientos no recibieron fertilizantes o cal. Los resultados se comparan con una parcela descubierta que recibió aplicaciones suficientes de fertilizantes y de cal para superar la mayoría de las limitaciones de la fertilidad del suelo (120 Kg de N/ha/cultivo y 70 Kg de K_2O /ha/cultivo, 4 ton de cal/ha/año y 45 Kg de P_2O_5 /ha/año). Los rendimientos obtenidos con este tratamiento

se consideraron como los máximos. Los cultivos con cobertura de *Panicum maximum* produjeron un promedio del 54% del rendimiento máximo sin insumos químicos. El efecto benéfico de la cobertura de *Pueraria phaseoloides* fue aún mayor, produciendo alrededor de un 80% del máximo rendimiento sin insumos orgánicos. La cobertura de *Panicum maximum* disminuyó las temperaturas máximas de la capa superior del suelo en un promedio 2°C en tardes secas y cálidas; también aumentó la humedad disponible del suelo, previno el resquebrajamiento de la superficie y redujo el crecimiento de las malezas. Ninguna de las dos coberturas tuvo efectos en las propiedades químicas del suelo, pero debido a los mayores rendimientos obtenidos que en las parcelas descubiertas sin fertilización, estimularon una mayor absorción de nutrimentos por los cultivos.

2. El Uso de Abonos Verdes

El Cuadro 18 también incluye tratamientos en los cuales *Panicum maximum* y *Pueraria phaseoloides* se incorporaron como abonos verdes, luego de cosechar cada cultivo. Los rendimientos obtenidos fueron en promedio 71 y 90% del máximo, respectivamente. Esto sugiere una sustitución casi equivalente de la leguminosa como abono verde por la fertilización inorgánica y el encalamiento. La incorporación de estos abonos verdes también aumentó la retención de humedad del suelo y redujo la densidad aparente y la compactación del mismo. El abono verde de *Pueraria phaseoloides* suministró al suelo cantidades considerables de nitrógeno, potasio, calcio y magnesio. La adición de bases

disminuyó la saturación de aluminio y proporcionó un ambiente más favorable para el crecimiento de las plantas. Como resultado aumentó la extracción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio por los cuatro cultivos (Wade, 1978).

El abono verde de *Pueraria phaseoloides* puede sustituir a los fertilizantes en Yurimaguas para obtener rendimientos moderados de cultivos continuos. Esto es esencialmente un equilibrio entre los nutrimentos suministrados como fertilizantes y el uso de abonos verdes. Tomando en cuenta la mano de obra involucrada en la incorporación de este abono verde, el costo de adicionar 1 Kg de N/ha en la forma de urea es aproximadamente igual al costo de la misma cantidad de nitrógeno que el abono. El equilibrio entre la mano de obra y los insumos comprados parece ser atractivo, pero tiene la desventaja del trabajo duro involucrado en la incorporación del abono verde : escasez de mano de obra en los períodos de alta demanda. Los agricultores de Yurimaguas parecen estar más interesados en obtener crédito para comprar fertilizantes y maquinaria, que en cargar e incorporar *Pueraria phaseoloides* con un azadón. Es necesario señalar que los tratamientos con abonos verdes mencionados no fueron cultivados *in situ*, sino que fueron recogidos en áreas adyacentes. Si se cultivaran *in situ*, los abonos verdes competirían al mismo tiempo con la producción de un cultivo adicional. La experiencia del Africa Occidental indica que los agricultores prefieren sembrar un cultivo adicional y usar fertilizantes, si disponen de éstos, que sembrar un cultivo para usarlo

como abono verde (Sánchez, 1976). El cultivo intercalado de abonos verdes con cereales puede ser una mejor alternativa, debido a que no se pierde tiempo en la producción del abono verde. Agboola y Fayemi (1972) han mostrado los efectos benéficos de dicha práctica en el occidente de Nigeria.

3. Enrastramientos Manejados

Una extensión adicional del concepto sobre el empleo de abonos verdes sería el de sustituir el enrastramiento convencional del bosque secundario por un tipo de enrastramiento que pueda mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo en un período de tiempo más corto. En Alfisoles de Nigeria se han obtenido resultados promisorios (Jairjebo y Moore, 1964; Juo y Lal, 1977) y el potencial del rastrojo de *Pueraria phaseoloides* sembrado se está estudiando actualmente en Yurimaguas, con resultados promisorios.

H. Sistema de Cultivos Intercalados y Cultivos

Múltiples

En las regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical los agricultores emplean ampliamente varias formas de cultivos intercalados. Estas van desde el intercalamiento de cultivos alimenticios anuales hasta combinaciones de cultivos anuales con pastos, con cultivos permanentes o con ambos. Por lo general estos modelos son más complejos en los regímenes údicos de humedad del suelo que en los regímenes ústicos. Los sistemas de cultivos intercalados distintos

del uso de cultivos como precursores del establecimiento de pasturas no son muy difundidos en las sabanas. En zonas údicas de bosque húmedo, el intercalamiento es practicado tanto en la agricultura migratoria como en la agricultura en gran escala. A diferencia de otras secciones de esta revisión, la mayor parte de la tecnología descrita está basada más en la práctica agrícola que en la experiencia de la investigación.

1. Intercalamiento de Cultivos Alimenticios

Los agricultores migratorios tradicionales casi invariablemente intercalan. En la amazonía se siembra un cultivo comercial justo después del desmonte, usualmente arroz de secano o maíz. Poco tiempo después se intercala yuca y plátano en hileras o al azar, con un espaciamento promedio de 2 x 2 m para la yuca y 3 x 5 m para el plátano. Cuando el cultivo de grano está listo para cosechar, la cubierta de la yuca toma su lugar; con el tiempo es reemplazado gradualmente por la cubierta del plátano, que puede durar hasta 2 años, dependiendo de la tasa de agotamiento de la fertilidad del suelo y de la presencia de ataques de nemátodos. Finalmente la cubierta del plátano en degradación es reemplazada gradualmente por un rastrojo de bosque secundario, del cual ocasionalmente se pueden cosechar racimos de plátano.

Existen muchas variaciones sobre el tema, algunas de las cuales han sido descritas por Pinchinat et al. (1976) en una revisión sobre los sistemas de cultivos múltiples en América tropical. Las variaciones

incluyen otros cultivos anuales alimenticios tales como el caupí, el guandul (*Cajanus cajan*), el ñame (*Dioscorea sp.*), la malanga (*Xanthosoma sp.*), la yautía (*Colocasia esculenta*) y una amplia variedad de hortalizas.

El patrón tradicional de cultivos intercalados tiene la ventaja de mantener una cubierta continua de cultivo sobre el suelo, imitando el rebrote de rastrojo de bosque y eventualmente convirtiéndose en él. La exposición del suelo a la erosión y los riesgos de compactación son limitados y el empleo de especies tolerantes a la acidez tales como arroz, yuca y plátano, permite una mejor utilización de los nutrientes disponibles en el suelo. Los cultivos con mayores requerimientos nutricionales tales como el maíz, o los más valiosos tales como el arroz, normalmente se cultivan primero, para capitalizar el valor de la ceniza como fertilizante.

La investigación ha mostrado que la intensificación de los sistemas intercalados puede dar mayores rendimientos anuales que cuando los cultivos individuales se siembran en monocultivo. En un Ultisol de Yurimaguas, Perú, Wade (1978) desarrolló también un sistema de hileras intercaladas el cual produjo nueve cultivos consecutivos en 21 meses. Un bosque húmedo virgen se desmontó mediante el método de corte y quema y el primer cultivo de arroz de secano se produjo sin fertilización. Después de la cosecha de arroz, se sembró maíz en hileras a 2 m de distancia y soya en tres hileras espaciadas a

50 cm entre las hileras de maíz. Cuarenta y cinco días después se insertaron estacas de yuca en las hileras de maíz, espaciadas a 1 m. La soya se cosechó a los 91 días y el maíz a los 105 días. La yuca creció vigorosamente en las antiguas hileras de maíz y se sembró caupí en los sitios en donde había estado la soya. Los cuatro cultivos se cosecharon en 266 días. Un segundo ciclo se inició un mes después. El maíz se sembró de la misma forma, pero el arroz de secano substituyó a la soya como cultivo acompañante. La yuca se sembró de nuevo en las hileras de maíz, esta vez 67 días después de la siembra del maíz. El maíz se cosechó a los 105 días y el arroz de secano a los 140 días. Cinco días antes de cosechar el arroz se sembró maní en donde estaba el arroz y maduró 96 días después. Hubo tiempo suficiente para cultivar caupí en donde había estado inicialmente el maní antes de que la cubierta de la yuca se cerrara.

Los rendimientos presentados en el Cuadro 19 incluyen una comparación de los monocultivos producidos al mismo tiempo.

Aunque los rendimientos de los cultivos individuales siempre fueron menores en sistemas intercalados que en monocultivos, el valor total de mercado de 1 ha de cultivos intercalados fue 20-28% mayor que si la misma hectárea se hubiera dividido entre los cuatro o cinco cultivos producidos en monocultivo. El intercalamiento también aumentó la extracción de nutrimentos y la eficacia del fertilizante nitrogenado empleado (Wade, 1978). La aplicación anual de fertilizantes

fue moderada para las condiciones del suelo muy ácidas; 1 ton de cal/ha, 45 Kg de N/ha, 100 Kg de P_2O_5 /ha, 45 Kg de K/ha, 10 Kg de S/ha, 0.5 Kg de B/ha y 0.5 Kg de Mo/ha.

Aunque este sistema de intercalamiento intensivo no requiere de altos niveles de insumos, sí requiere del empleo intensivo de mano de obra. Por consiguiente, su valor se puede limitar a pequeñas áreas cercanas a la granja en tanto que los sistemas de menor demanda de mano de obra pueden ser empleados en mayor escala.

Otros sistemas de cultivos intercalados puede ser aún más eficientes. Leihner (1979; CIAT, 1980) indicó que, cuando la yuca se intercaló con el caupí o maní en un Orthoxic Palehumult de Quilicaho, Colombia, a las densidades normales de siembra, ninguno de los cultivos sufrió disminuciones significativas en sus rendimientos. Esto aparentemente se debió a una menor competencia interespecífica entre las leguminosas de grano de madurez temprana y la yuca de madurez tardía. La siembra de yuca en hileras dobles espaciadas a 2-3 m con 50 cm entre hileras ha aumentado significativamente los rendimientos y favorecido las ventajas de los cultivos intercalados en Brasil (Oliveira, 1979). Estos y otros refinamientos pueden aumentar aún más el valor de intercalar cultivos anuales tolerantes a la acidez en las regiones de Oxisoles-Ultisoles.

2. Intercalamiento de Cultivos Anuales con Cultivos

Perennes

La siembra de cultivos perennes tolerantes a la acidez tales como el caucho, la palma de aceite, el guaraná y especies maderables, requiere de una cobertura alternativa del suelo hasta que los árboles produzcan una cubierta cerrada. Actualmente hay numerosas variaciones del sistema agroforestal "taungya" que se están practicando en el Amazonas. El maíz, el caupí y la batata se cultivan entre hileras de caucho, palma de aceite y guaraná durante un período de 2-5 años, hasta que la cubierta de los árboles se desarrolle plenamente (UEPAE de Manaus, 1978; Andrade, 1979). Aunque no hay datos disponibles sobre los rendimientos relativos de los cultivos anuales y perennes, parece existir poca competencia interespecífica durante los primeros 2-3 años. Además de la producción de alimentos mientras que se establece una plantación, el suelo entre las hileras de árboles se protege contra la erosión durante la mayor parte del año, excepto durante los intervalos entre la recolección de la cosecha de los cultivos anuales y la siembra de los cultivos posteriores.

3. Intercalamiento de Pastos con Cultivos Arbóreos

Cuando se siembra una pastura de leguminosa o de gramínea-leguminosa bajo cultivo de árboles jóvenes, el suelo está mejor protegido que con cultivos anuales. En América tropical existen muchas combinaciones (Thomas, 1978). *Pueraria phaseoloides* se emplea como cober-

tura del suelo bajo el caucho; plantaciones de *Gmelina arborea* o *Dalbergia nigra* en Brasil, presumiblemente suministran el nitrógeno a los cultivos de árboles. En algunos casos, el ganado pastorea el *pueraria*, con poco daño aparente a la producción de caucho con un manejo cuidadoso. Cuando los árboles se siembran a una densidad menor que la óptima, algunas pasturas de gramíneas-leguminosas persisten y producen carne y leche. Este es el caso de las pasturas de *Brachiaria humidicola* - *Desmodium ovalifolium* bajo un cultivo sembrado de laurel (*Cordia alliodora*), una especie de crecimiento rápido en suelos aluviales no ácidos de la amazonía ecuatoriana (Bishop, 1981).

El valor de la producción agroforestal como componente del manejo de suelos con bajos insumos es ahora ampliamente reconocido (Mongi y Huxley, 1979). Sin embargo, es difícil encontrar datos de investigación realizada en agrosilvicultura. La falta de datos que acompañen estas combinaciones tan interesantes enfatiza la necesidad de una investigación sistemática orientada hacia el entendimiento de la dinámica del suelo y hacia el mejoramiento del manejo del suelo en los sistemas agrosilviculturales.

El potencial de algunas sucesiones de cultivos anuales-pasturas-cultivos permanentes en suelos ácidos de los trópicos húmedos de América tropical es indudablemente enorme. Es indudable que el sistema de producción más estable en este ambiente es el que produce

esencialmente otra cubierta de árboles. También es aquel que requiera el menor nivel de insumos químicos debido a que se restablece un ciclo de nutrimentos entre el suelo y los árboles. Es necesario producir cultivos alimenticios tolerantes a la acidez tales como el arroz, la yuca, la soya, el maní, el caupí, el plátano y otros con el fin de proporcionar alimentos pero gradualmente se pueden reemplazar por pasturas o mejor por cultivos perennes. Por ejemplo, la palma de aceite puede producir 5 ton/ha/año de aceite sin aplicar cal y con aplicaciones moderadas de fertilizantes en Oxisoles y Ultisoles (Alvim, 1981). Esto corresponde a 3-5 veces el potencial de producción de aceite por hectárea de otros cultivos oleaginosos, incluyendo la soya. El aceite de palma puede ser empleado directamente como combustible en motores diesel con modificaciones menores. La producción masiva de bioenergía totalmente renovable puede acompañar a una mayor producción agrícola y ganadera en las regiones de Oxisoles-ULTisoles.

I. Conclusiones

El objetivo deseable de mantener el suelo protegido con una cobertura vegetal durante la mayor parte del año se puede lograr mediante varios componentes de la tecnología de bajos insumos en las regiones de Oxisoles-Ultisoles. Algunos, tales como la siembra de pasturas a baja densidad toman ventaja de la infertilidad del suelo ácido para suprimir el crecimiento de malezas. Un entendimiento de los cambios en las propiedades químicas y físicas del suelo con el tiempo es útil

para diseñar o mejorar los sistemas agrícolas continuos en regiones de suelos ácidos e infértiles.

Desde el punto de vista ecológico, sería ideal si esta revisión pudiera llegar hasta este punto. Desafortunadamente, pocos de los sistemas mencionados con anterioridad pueden permanecer productivos a menos que se les adicione cal y fertilizantes para superar parcialmente los limitantes críticos de los suelos ácidos. Las secciones restantes de esta revisión tratan sobre estos aspectos.

V. MANEJO DE LA ACIDEZ DEL SUELO

En las regiones templadas del norte del mundo, las limitaciones impuestas por la acidez del suelo se eliminan, en gran parte, mediante el encalamiento para aumentar el pH del suelo hasta llevarlo a un valor casi neutro. Esta estrategia no es aplicable a la mayoría de las regiones de Oxisoles-Ultisoles debido a la distinta naturaleza química de los minerales de las arcillas de baja actividad, lo cual resulta con frecuencia en reducciones del rendimiento si dichos suelos se encalan hasta su neutralidad (Kamprath, 1971). Además, los costos del transporte de la cal son con frecuencia muy altos en muchas áreas de sabanas y bosques húmedos. Sin embargo, las principales limitaciones impuestas por la acidez del suelo -- toxicidad de aluminio y manganeso y deficiencia de calcio y magnesio -- se deben superar para lograr una agricultura exitosa en estas regiones. La importancia de estos factores limitantes se indicó en el Cuadro 2. La toxicidad de aluminio y las deficiencias de calcio y magnesio se presentan en aproximadamente en un 70% de las regiones de suelos ácidos e infértiles de América tropical y en aproximadamente la mitad de la extensión territorial de la América tropical. Para atenuar las limitaciones impuestas por la acidez del suelo sin hacer aplicaciones masivas de cal se utilizan tres estrategias : (1) cal para reducir la saturación de aluminio por debajo de los niveles tóxicos para sistemas agrícolas específicos; (2) cal para suministrar calcio y magnesio y para estimular su movimiento en el subsuelo; y (3) el uso de especies y variedades tolerantes

a las toxicidades de aluminio y manganesio.

A. Cal para Disminuir la Saturación de Aluminio

Hay tres consideraciones básicas que se deben tener en cuenta al adicionar cal para disminuir la saturación de aluminio: la determinación de la cantidad de cal que se debe adicionar si es que es necesario, la calidad de la cal que se debe utilizar y la promoción del efecto residual más prolongado.

1. Determinación de la Dosis de Cal

El diagnóstico de la toxicidad de aluminio en suelos ácidos de América tropical se ha basado en el aluminio intercambiable extraído con KCl 1 N, desde la década de los sesenta (Mohr, 1960; Cate, 1965; Kamprath, 1970 y Salinas, 1978). La recomendación para el encalamiento se deriva comunmente de las siguientes fórmulas en la que el requerimiento de cal se expresa ya en miliequivalentes de calcio o toneladas de CaCO_3 equivalente por hectárea:

$$\text{meq Ca}/100 \text{ g de suelo} = 1.5 \times \text{meq Al Inter.}/100 \text{ g.} \quad (1)$$

$$\text{ton CaCO}_3\text{-eq/ha} = 1.65 \times \text{meq Al. Inter.}/100 \text{ g.} \quad (2)$$

Las aplicaciones de cal con base en estas fórmulas generalmente neutralizan la mayor parte de la mayor parte del aluminio intercambiable y aumentan el pH del suelo a 5.2 - 5.5. La Figura 13 muestra la relación entre el pH y los niveles de aluminio intercambiable en un suelo ácido de Panamá (Méndez, 1973).

Los muy bajos niveles de bases intercambiables comunes a estos suelos se deben tener en cuenta junto con las cantidades de aluminio intercambiable presentes (Olmos y Camargo, 1976; Freitas and Silveira, 1977). El porcentaje de saturación de aluminio ($\frac{\text{Al Inter.}}{\text{Inter. Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Al}} \times 100$) expresa en forma correcta estas relaciones. Lopes y Cox (1977a) indican que, en la mayoría de los casos, el porcentaje de saturación de aluminio se debe considerar primero, puesto que los suelos que presentan el mismo nivel de aluminio intercambiable pero diferentes grados de saturación de aluminio, presentarían diferentes respuestas al encalamiento en las mismas dosis de cal. Además, Evans y Kamprath (1970), Kamprath (1971) y otros investigadores, incluyendo Spain (1976) han indicado que, para muchos cultivos, los requerimientos de cal basados exclusivamente en aluminio intercambiable pueden sobreestimar las dosis de cal debido a diferentes grados de tolerancia de las plantas al aluminio.

Desde el trabajo pionero adelantado por Menezes y Araujo en Brasil hace 30 años (Coimbra, 1963) de intercalar un suelo ácido de América Tropical, hasta un experimento reciente establecido hace ocho años también en Brasil (Gonzalez et al., 1979), el enfoque común ha sido el de encalar el suelo para lograr una respuesta óptima del cultivo. Este criterio se puede interpretar como el cambiar el suelo para satisfacer las demandas de la planta. Este enfoque es difícil de aplicar en muchas áreas de América tropical debido a limitaciones de índole económica. También se debe anotar que Kamprath (1971) indicó que el encalamiento excesivo puede tener un efecto en detrimento del crecimiento de las plantas, como por ejemplo, una deficiencia de cinc inducida por la cal

en yuca (Spain, 1976). Por consiguiente, es importante determinar la fórmula más apropiada para convertir el Al intercambiable a la cantidad de cal para sistemas específicos de suelo-cultivos. Cochrane et al. (1980) desarrollaron una fórmula para determinar la cantidad de cal que se necesita para disminuir el nivel de saturación de aluminio de la capa superior del suelo al rango deseado:

$$\text{Cal requerida (ton CaCO}_3\text{-eq/ha)} = 1.8 (\text{Al-RAS (Al + Ca Mg)})/100, \quad (3)$$

donde RAS es el porcentaje crítico de saturación de aluminio requerido por un cultivo, una variedad o un sistema agrícola determinado para superar la toxicidad de aluminio y Al, Ca y Mg son los niveles intercambiables de estos cationes expresados en meq/100 g. Al compararla con datos reales de campo, la capacidad de predicción de esta ecuación es excelente (Cochrane et al., 1980). Una ventaja adicional es que no se requiere un análisis de suelo exhaustivo sino solamente la extracción de aluminio, calcio y magnesio con KCl 1 N e información sobre la tolerancia de los cultivos al aluminio en términos del porcentaje de saturación de Al. La adopción de dicha fórmula podría conducir a una utilización más efectiva de la cal y a ahorros considerables en las cantidades aplicadas como también en los costos.

2. Utilización de Materiales de Calidad para el Encalamiento

Además de la forma para determinar las cantidades de cal que se deben aplicar, es importante considerar la calidad del material para el encalamiento. Desafortunadamente, en las regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical, por lo general es poca la atención que se le

presta al tamaño de las partículas y composición química de la cal, excepto si es calcítica o dolomítica (Lopes, 1975). Es necesario fomentar estudios de caracterización de depósitos locales de cal tales como los realizados por Guimarães y Santos (1968) para el Estado de Pará en la Amazonía brasilera. El material ideal para encalamiento se debe encontrar en la forma carbonatada y el 100% debe pasar por un tamíz 10 y el 50% por un tamíz 100. Las fuentes de CaCO_3 gruesas rara vez producen las respuestas deseadas en rendimiento del primer cultivo debido a que reaccionan lentamente. Con el fin de compensar ésto, los agricultores con frecuencia aplican dosis más altas que las recomendadas lo cual puede causar problemas por sobreencalamiento en cultivos posteriores (Camargo et al., 1962; Jones y Freitas, 1970).

En partes del Amazonas, la mayoría de las fuentes de cal se explotan para fines de construcción y se produce cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este material es extremadamente reactivo y sus efectos residuales son muy cortos (NCSU, 1975, 1976). La alternativa para una mejor utilización de esta cal hidratada es utilizar dosis de aplicación más pequeñas y más frecuentes (Wade, 1978). Una mejor alternativa es solicitarle a los productores de cal que muelan la caliza al tamaño apropiado y mantenerla así en la forma carbonatada.

Como el magnesio es particularmente limitante en Oxisoles y Ultisoles, se prefieren las fuentes de cal dolomítica. Una relación Ca:Mg de 10:1 en el material para encalamiento generalmente se considera adecuada, aunque existe muy poca evidencia que sostenga esta aseveración.

3. Efectos Residuales de la Cal

Generalmente se espera que los efectos benéficos del encalamiento de suelos ácidos duren varios años. Sin embargo, los efectos residuales por lo general duran menos en las regiones tropicales que en las templadas debido a la mayor precipitación y a las temperaturas más altas (Lathwell, 1979). La estimación de los efectos residuales del encalamiento de suelos ácidos es un factor primordial de manejo de los suelos en las regiones údicas de bosques húmedos tropicales y ústicas de sabanas. La duración del efecto residual también dependerá del ecosistema. En general, los suelos ácidos en los bosques húmedos tropicales presentarán efectos residuales más cortos que las regiones de sabana debido a la liberación más rápida del aluminio de los complejos de materia orgánica y a la mayor remoción de bases por las plantas en sistemas anuales de producción de cultivos y quizás a mayores pérdidas por lixiviación en los bosques húmedos (Villachica, 1978).

La Figura 14 muestra los cambios en los niveles intercambiables de aluminio, calcio y magnesio en la capa superior del suelo después de 4.5 años de haber aplicado cal en un oxisol de Carimagua, Colombia, en el cual se cultivaron consecutivamente siete cultivos anuales. En todas las dosis de cal se observó un aumento en el nivel de aluminio intercambiable con el tiempo, excepto en la dosis alta, probablemente debido a lixiviación de bases, liberación de iones H^+ de la materia orgánica y acidez residual de la fertilización nitrogenada. Las pérdidas fueron del orden de 1-2 ton de cal/ha para el período de 4.5

años. Howeler (1975) consideró que una aplicación anual de 200-500 kg de cal/ha era suficiente para mantener un nivel adecuado de calcio y magnesio en este suelo en condiciones de cultivo continuo y para invertir los aumentos en el nivel de aluminio intercambiable anteriormente mencionados.

El Cuadro 20 resume los resultados de los efectos residuales de un experimento de encalamiento a largo plazo realizado en Brasil después de siete cultivos consecutivos (cinco de maíz, uno de sorgo y uno de soya). Después de 6.5 años, el pH del suelo disminuyó en todas las dosis de cal probablemente debido a la acidez residual por los fertilizantes nitrogenados. El nivel de aluminio intercambiable aumentó con el tiempo y los niveles de calcio y magnesio intercambiables disminuyeron. Los niveles de saturación de aluminio aumentaron en aproximadamente un 20% de los valores iniciales para las dosis de 0, 1 y 2 ton/ha. Los rendimientos de grano indicaron un excelente efecto residual, aún obteniéndose más del 80% del rendimiento máximo de soya en el séptimo cultivo sucesivo con la dosis de cal de 1 ton/ha. Este resultado probablemente se asocia con la tolerancia al aluminio relativamente alta de la variedad de soya utilizada (UFV-1).

B. La Cal como Fertilizante de Calcio y Magnesio

El énfasis tradicional en la fertilización con NPK en América tropical (con la adición reciente del azufre) ha distraído la atención de las difundidas deficiencias de calcio y magnesio en las regiones de Oxisoles-Ultisoles. En sistemas de altos insumos, las fuentes tradi-

cionales de fertilizantes tales como superfosfato simple y cal dolomítica frecuentemente satisfacen los requerimientos nutricionales de las plantas en lo que respecta a los tres elementos secundarios. En sistemas de bajos insumos con plantas tolerantes a altos niveles de saturación de aluminio y bajos niveles de fósforo aprovechable cultivadas en suelos con baja capacidad efectiva de intercambio catiónico (CEIC), la corrección de las deficiencias de calcio y magnesio requiere atención directa.

1. Disponibilidad de Calcio y Magnesio

Los principales factores que afectan la disponibilidad de calcio y magnesio en Oxisoles y Ultisoles incluyen el nivel de estos nutrimentos en la forma intercambiable, la CEIC, los niveles de aluminio intercambiable, la textura del suelo y la mineralogía de las arcillas (Kamprath y Foy, 1971).

Los niveles de calcio y magnesio intercambiables en Oxisoles y Uxisoles generalmente son muy bajos. El rango encontrado en sabanas de Brasil, Colombia y Venezuela es del orden de 0.1-0.7 meq Ca/100 g y 0.06 - 0.4 meq Mg/100 g en la capa superior del suelo (Lopes y Cox, 1977a; Salinas, 1980; C. Sánchez, 1977). Los niveles de calcio y magnesio en el subsuelo generalmente son menores y a veces no son detectables en subsuelos de Oxisoles (Ritchey et al., 1980).

Los niveles de calcio y magnesio intercambiables en Oxisoles y Ultisoles de bosques húmedos son relativamente mayores, especialmente en la capa superior del suelo. El ejemplo presentado anteriormente en

el Cuadro 12 indica un rango de 0.4 - 1.46 meq Ca/100 g en la capa superior del suelo antes del desmonte y la quema. Los mismos datos indican un rango de 0.07 - 0.33 meq Mg/100 g. En consecuencia, los niveles de calcio intercambiable en la capa superior del suelo parecen ser mayores en los bosques húmedos que en las regiones de sabana, pero los niveles de magnesio intercambiable no presentan diferencias. Las disminuciones de estos dos elementos con la profundidad son más marcadas en los bosques húmedos que en las sabanas, pero los niveles permanecen dentro de un rango detectable. En la sección IV.B se describió la dinámica de estos dos nutrimentos como resultado de la quema de bosques húmedos.

Las bajas CEIC de la mayoría de los Oxisoles y Ultisoles proporcionan algunas ventajas y desventajas para el suministro de calcio y magnesio. La primera desventaja es la rápida lixiviación durante períodos de lluvias intensas. Durante dichos períodos pueden ocurrir condiciones anaeróbicas temporales que inhiben la absorción de calcio y magnesio por las raíces. Durante la estación seca, la sequía puede acentuar las deficiencias de calcio y magnesio. La concentración de estos elementos en muestras de tejido de Melinis multiflora y especies nativas de sabana disminuyó significativamente durante la estación seca en Carimagua (Lebdosoekojo, 1977). Las plantas se enfrentan, por lo tanto, a una situación difícil: probablemente hay una disponibilidad adecuada de calcio y magnesio durante parte de la estación lluviosa; durante períodos de intensa lluvia ocurren pérdidas rápidas por lixiviación; y durante la estación seca hay una baja disponibilidad de ambos

nutrimentos debido a la sequía (Gualdrón y Spain, 1980). Sin embargo, tanto las plantas nativas como las introducidas en sabanas de Oxisol parecen exhibir un mejor comportamiento en lo que respecta al calcio y al magnesio que lo que se puede inferir de los bajos niveles en el suelo y las relaciones adversas dependientes de la humedad. Rodríguez (1975) indicó que algunas especies pueden presentar mecanismos más eficientes de absorción de calcio y magnesio que los que actualmente se conocen.

El aluminio compite con el calcio en la solución del suelo por sitios de intercambio. Por consiguiente, la toxicidad de aluminio se puede disminuir mediante adiciones de calcio (Millaway, 1979). En el caso del cacao, la presencia del aluminio disminuye la absorción de calcio pero no la translocación hacia las partes aéreas de la planta (García, 1977). La reducción en el desarrollo radical en condiciones de altas concentraciones de aluminio podría deberse a la deficiencia de calcio, la cual obstaculiza el desarrollo de raíces primarias (Zandstra, 1971).

En general, los suelos dominados por arcillas 1:1 requieren un menor nivel de saturación de bases para una disponibilidad adecuada de calcio y magnesio para las plantas que los suelos dominados por arcillas 2:1 (Kirkby, 1979). Esta es una ventaja de los Oxisoles y Ultisoles debido a la predominancia en ellos de arcillas 1:1.

2. Requerimientos de Fertilizantes

Es escasa la información que existe sobre las dosis de aplicación de cal para satisfacer los requerimientos de fertilización con calcio y magnesio. El Cuadro 21 resume las experiencias obtenidas en Oxiso-

les de los Llanos Orientales de Colombia con niveles de 0.1 - 0.4 meq/100 g de ambos elementos.

En algunos casos, la respuesta a 0.5 ton/ha de cal dolomítica se debe al magnesio. Spain (1979) presentó un informe al respecto para la fase de establecimiento y mantenimiento de dos leguminosas forrajeras, Desmodium ovalifolium y Pueraria phaseoloides, en Carimagua, Colombia. En un experimento a largo plazo realizado en Brasilia, Brasil, una respuesta directa al magnesio también respondió por la mayor parte de la respuesta a la cal por un primer cultivo de maíz (NCSU, 1974). En Ultisoles de bosques húmedos en Yurimaguas, Peru, en donde no hay disponible cal dolomítica, Villachica (1978) recomendó dosis de aplicación de magnesio del orden de 30 kg Mg/ha/cultivo para superar las deficiencias de magnesio y prevenir los desbalances de K/Mg.

Estudios realizados recientemente muestran que las gramíneas tropicales también difieren en sus requerimientos de calcio (CIAT, 1981). La Figura 15 muestra la respuesta de campo de siete especies de gramíneas cultivadas en un Oxisol de Carimagua en función de la concentración de calcio en el tejido de las plantas. Los requerimientos críticos internos de calcio oscilaron entre 0.32 y 0.60%. La Figura 15 también muestra los niveles correspondientes de saturación de aluminio, saturación de calcio y requerimientos de cal según la fórmula de Cochrane et al. (1980). Esta información indica que estas especies se deben calsificar no solamente según su tolerancia al aluminio, sino también según sus diferentes requerimientos de calcio.

3. Movimiento Descendente del Calcio y Magnesio

No importando el fin por el cual se aplique cal (ya sea para disminuir la saturación de aluminio o para suministrar calcio y magnesio, o ambos), sus efectos benéficos ocurren principalmente a la profundidad a la cual se incorpore, puesto que la cal no se mueve en los suelos en forma considerable. El subsuelo de la mayoría de los Oxisoles y Ultisoles es por lo general ácido y con frecuencia presenta una barrera química para el desarrollo radical, ya sea debido a la toxicidad causada por el aluminio, a una deficiencia extrema de calcio o a ambas causas. Es común observar raíces de cultivos anuales confinadas casi exclusivamente a la ^{zona superficial} ~~superficie superior del suelo~~ encalada, con poca penetración hacia el subsuelo ácido en los Oxisoles de sabana (Gonzales, 1976; Bandy, 1976) y Ultisoles de bosques húmedos (Bandy, 1977; Valverde y Bandy, 1981). Dichas plantas sufren por deficiencia de agua cuando ocurren períodos de sequía a pesar de tener suficiente humedad del suelo almacenada en el subsuelo. Ocurren pérdidas grandes en rendimiento cuando ocurren sequías temporales en etapas críticas del crecimiento durante la estación lluviosa en regiones de Oxisoles (Wold, 1977).

Un objetivo primordial de la tecnología de bajos insumos es la de estimular el desarrollo radical hacia dichos subsuelos ácidos como una alternativa para los sistemas de riego suplementario mucho más costosos. Se han diseñado tres estrategias para superar este problema: (1) aplicaciones profundas de cal en Oxisoles, (2) estímulo al movimiento descendente de calcio y magnesio y (3) el uso de cultivares y espe-

cies tolerantes al aluminio.

A pesar de que la incorporación de las mismas dosis de cal a los primeros 30 cm de profundidad en vez de los primeros 15 cm no parece ser una tecnología de bajos insumos, de hecho ha aumentado los rendimientos de maíz en varias estaciones en un Oxisol cerca de Brasilia, Brasil (NCSU, 1974; Salinas, 1978; Gonzalez et al., 1979). Esta práctica es factible en Oxisoles bien granulados que pueden ser labrados a una profundidad de 30 cm sin mayores aumentos en el consumo de combustible de los tractores. En Ultisoles, con un cambio marcado en su textura dentro de los primeros 30 cm de profundidad, esta práctica no se puede recomendar puesto que puede crear problemas físicos severos en ese suelo (Sánchez, 1977). Esto indica que no solamente se deben considerar parámetros químicos del suelo al definir la práctica de encalamiento más apropiada, sino que también hay que tener en cuenta los parámetros físicos del suelo.

Olmos (1971) presentó resultados experimentales que demuestran diferencias significativas entre varias clases de suelos ácidos debido al contenido de aluminio en el subsuelo. La Figura 16 muestra los cambios en pH, calcio, magnesio, potasio y saturación de aluminio en el perfil de un suelo Tropeptic Haplustox. En los primeros 80 cm se encuentran niveles de toxicidad de aluminio que inhiben la penetración de raíces. Por debajo de esta profundidad, la saturación de aluminio disminuye a valores de menos del 60% (Salinas y Delgadillo, 1980).

Una ventaja primordial de muchos suelos ácidos e infértiles es que

sus propiedades físicas y químicas permiten el movimiento descendente de calcio y magnesio hacia las capas del subsuelo, disminuyendo de esta manera los estreses causados por la acidez del suelo a mayor profundidad y aumentando el desarrollo radical. El movimiento descendente de calcio y magnesio aplicados en la forma de cal tiene poco significado práctico en otros suelos dominados por arcillas de alta actividad.

Como se mencionó con anterioridad, la cal no se mueve considerablemente en los suelos, pero el calcio y el magnesio intercambiables sí presentan un movimiento considerable en Oxisoles y Ultisoles de baja CICE acompañados por aniones tales como sulfatos o nitratos (Pearson, 1975; Ritchey et al., 1980). La primera evidencia de este fenómeno en América Latina tropical la registró Pearson et al. (1962) después de aplicar aproximadamente 800 kg N/ha/año en la forma de sulfato de amonio a pasturas de gramíneas fertilizadas intensivamente en Puerto Rico. La posible presencia de grandes concentraciones de aniones acompañantes estimuló el movimiento rápido de cationes básicos hacia el subsuelo.

En los últimos tres años se han hecho observaciones similares en Oxisoles de las sabanas brasileras y colombianas y en Ultisoles de la Amazonía peruana, pero a niveles muchos más bajos de cal y de fertilizantes (Salinas, 1978; NCSU, 1978; Villachica, 1978; Ritchey et al., 1980; Gualdrón y Spain, 1980). La Figura 17 muestra los cambios en las propiedades del suelo con la profundidad 40 meses después de aplicar cal a los primeros 15 cm de un Oxisol brasilerero y cultivándolo continuamente por cinco años. La acidez del subsuelo disminuyó gradualmente, en especial cuando se utilizaron altas dosis de cal. Con dosis de

2 y 4 ton/ha de cal, el nivel crítico de saturación de aluminio del 60% para el maíz se alcanzó a una profundidad de aproximadamente 30 cm. Con 8 ton/ha, este nivel se alcanzó a una profundidad de aproximadamente 80 cm. El volúmen de enraizamiento del cultivo aumentó, en efecto, a medida que disminuyó la barrera de toxicidad de aluminio (Bandy, 1976).

Los resultados anteriores se han confirmado en experimentos realizados en columnas de laboratorio y en observaciones de campo con el mismo suelo. Ritchey et al. (1980) observó un movimiento significativo de calcio hasta profundidades de 180, 75 y 25 cm cuando se mezcló CaCl_2 , CaSO_4 y CaCO_3 , respectivamente, con los primeros 15 cm de una columna de Oxisol y la precipitación anual equivalente se hizo pasar por ella (Fig. 18). En condiciones de campo, el yeso incluido en superfosfato simple aumentó el pH del subsuelo y los niveles de calcio más magnesio, en tanto que la saturación de aluminio disminuyó a profundidades de 75-90 cm a los 3-4 años después de la aplicación (Fig. 19). Las raíces de maíz que crecieron en el ambiente de este subsuelo mejorado lograron absorber agua y soportar las sequías (Ritchey et al., 1980).

Es interesante observar que se pueden alcanzar aumentos considerables en los niveles de calcio y magnesio en el subsuelo mediante aplicaciones moderadas de cal (1-2 ton/ha) y superfosfato simple (70 kg P/ha).

C. Selección de Variedades Tolerantes al Aluminio

El principal componente del manejo de la acidez del suelo es la selección de variedades productivas que sean tolerantes a la toxicidad

del aluminio. Un procedimiento preferido para el efecto es la selección de un gran número de ecotipos ya sea en soluciones de cultivo, en el invernadero, en el campo o una combinación de los tres. Para lograrlo exitosamente, se requiere de la colaboración cercana entre especialistas en suelos y fitomejoradores. Entre las técnicas de selección en soluciones nutritivas de cultivo, la prueba de la hematoxilina propuesta por Polle et al. (1978) es muy útil. Sin embargo, los resultados de la selección en cultivos nutritivos o en invernaderos se deben validar en el campo con un rango representativo de los cultivares seleccionados. Spain et al. (1975), Howeler y Cadavid (1976), Salinas (1978) y Salinas y Delgadillo (1980) presentan ejemplos de dichas correlaciones. Los estudios adelantados por los últimos dos investigadores mencionados incluyen la tolerancia conjunta a los estreses de aluminio y fósforo puesto que éstos tienden a ocurrir al mismo tiempo (Salinas, 1978). En consecuencia, los cultivares se pueden clasificar por el nivel crítico de saturación de aluminio requerido para alcanzar un 80% del rendimiento máximo. Para una localidad específica, este parámetro se puede expresar en términos del requerimiento de cal mediante la utilización de la fórmula de Cochrane et al. (1980), incorporando el porcentaje requerido de saturación de aluminio (RAS).

1. Selección de Cultivos Anuales

La Figura 20 muestra un ejemplo de 10 variedades de trigo seleccionadas de esta manera en un suelo típico Haplustox de Brasilia, Brasil. Los resultados se presentan en un diagrama modificado de Cate-Nelson

(Cate y Nelson, 1971), en el cual se establece la relación gráfica entre el porcentaje de máximo rendimiento y la saturación de aluminio, con el nivel crítico de saturación de aluminio indicado por una flecha vertical. Los niveles críticos oscilaron entre 22 y 60% de saturación de aluminio, que para ese suelo en particular representa un requerimiento de cal de 0.5 - 1.6 ton CaCO_2 -eq/ha. La Figura 21 muestra datos similares obtenidos con cinco variedades de arroz seco. Los niveles críticos de saturación de aluminio oscilaron entre 22 y más del 70% y los requerimientos de cal entre 0.2 y 1.4 ton de CaCO_3 -eq/ha. Estos resultados confirman la existencia de una amplia tolerancia diferencial al aluminio tanto en arroz como en trigo. La variedad de arros Pratao Precoce no fue afectada por el aluminio dentro del rango probado, en tanto que las variedades sensibles Flotante y Batatais mostraron una respuesta lineal decreciente en rendimiento a una saturación de aluminio en aumento.

La tendencia general indica que las variedades de trigo mejoradas en Brasil exhiben una mayor tolerancia a ambos factores de estrés que las variedades mejoradas en México tales como Sonora 63, INIA 66 y CIANO. Las variedades brasileras se seleccionaron en condiciones de suelos ácidos, en tanto que las mejicanas se seleccionaron en suelos calcáreos. Entre las variedades brasileras, las dos desarrolladas más cerca del Cerrado (IAC-5 en Campinas y BH 1146 en Belo Horizonte) fueron más tolerantes al aluminio y al bajo contenido de fósforo que las desarrolladas en Rio Grande de Sul (IAS-20 y IAS-55), en donde los suelos, aunque ácidos, son generalmente más fértiles que en el Cerrado.

También se observa alguna variabilidad entre las variedades mejicanas. Estos resultados indican buenas posibilidades de combinar la tolerancia al aluminio de las variedades brasileras con el tipo de planta de bajo porte resistente al volcamiento de las variedades mejicanas.

En un tercer estudio de campo realizado en Oxisoles en el Estado de Paraná, Brasil, se comparó la tolerancia diferencial al aluminio de 10 cultivares de soya. Muzilli et al. (1978) definió el nivel crítico de saturación de aluminio como el requerido para obtener un 80% del rendimiento máximo. Este procedimiento es similar al indicado por Salinas (1978) en las Figuras 20 y 21 puesto que los diagramas modificados de Cate-Nelson indican que los rendimientos a los niveles críticos de saturación de aluminio se encontraban en el orden del 70-80% del máximo. El Cuadro XXII muestra la clasificación de Muzilli et al. Ninguna se clasificó como tolerante puesto que el nivel de saturación de aluminio que Muzilli et al. definieron para materiales tolerantes fue de más del 25%.

Estos niveles críticos pueden variar con la localidad y el manejo y particularmente con la disponibilidad de calcio, magnesio y fósforo en el suelo durante el experimento. Por ejemplo, en Yurimaguas, Perú, se probó la variedad de soya Improved Pellikan (NCSU, 1976), utilizando el mismo procedimiento que en el experimento realizado en Brasil. Improved Pellikan mostró un nivel crítico de saturación de aluminio del 40%, nivel al cual no se aproximó cultivar alguno de soya en Paraná. Sin embargo, dichos estudios muestran claramente los cultivares que son más tolerantes. El estudio de Paraná indica que los cultivares

Bossier, Vicoja y UFV-1 son los que se deben utilizar en vez de Andrews, Cobb o Florida en lo que respecta a su tolerancia al aluminio.

2. Selección de Especies para Pasturas

Salinas y Delgadillo (1980) siguieron un enfoque un poco diferente en su programa de selección sistemática de ecotipos de gramíneas y leguminosas por su adaptación al estrés de aluminio y fósforo. Se consideraron tanto los rendimientos absolutos como relativos puesto que el vigor del crecimiento durante la fase de establecimiento es una consideración importante en la selección de ecotipos superiores de pastos. Salinas y Delgadillo consideraron un nivel máximo de rendimiento del 50% como el índice de supervivencia, un rendimiento máximo de 50-79% como tolerancia moderada y un 80% o más del rendimiento máximo como alta tolerancia en condiciones de estrés severo de aluminio y fósforo. El límite del 50% es consistente con la toxicología biológica (Matsumura, 1976; Liener, 1969; Lal, 1980), en tanto que el límite del 80% se estableció como el punto más allá del cual la curva de respuesta es casi plana.

El Cuadro 23 , adaptado de Salinas y Delgadillo (1980), resume el comportamiento de seis ecotipos de gramíneas y nueve de leguminosas en diferentes niveles de estrés de aluminio y fósforo en Carimagua, Colombia. La capa superficial del Oxisol sin enmienda presentó una saturación de aluminio del 93% y 1.7 ppm de P aprovechable (extraído mediante el método de Bray II). Los tratamientos incluyeron dosis de cal de 0.5 ton/ha para suministrar calcio y magnesio y 5 ton/ha para neutralizar la mayor parte del aluminio intercambiable. Esta

última dosis disminuyó la saturación de aluminio a un nivel de aproximadamente 25%. Se incluyeron dos dosis de fósforo: 17 kg P/ha como mínima y 227 kg P/ha para aminorar y superar la mayor parte de la capacidad de fósforo del suelo. El diseño de campo fue un factorial compuesto por cuatro dosis de cal x 3 niveles de fósforo. La tolerancia de la planta se clasificó como alta (H) cuando el rendimiento relativo excedió el 80%, moderada (M) entre 50 y 79%, supervivencia (S) entre 1 y 49% y muerte (X) para aquellas plantas que no sobrevivieron.

El Cuadro 13 muestra una respuesta diferencial marcada entre ecotipos de gramíneas y ecotipos de leguminosas. La valoración de la tolerancia varió con los diferentes niveles de estrés de aluminio y fósforo. En el caso de las gramíneas se observó una respuesta global positiva en crecimiento a medida que se eliminaron gradualmente los estreses, excepto por una disminución en los rendimientos de Brachiaria humidicola y Andropogon gayanus en los altos niveles de cal y fósforo. B. humidicola y A. gayanus mostraron la mayor tolerancia global, en tanto que Pennisetum purpureum presentó la menor. Los rendimientos absolutos mostraron que A. gayanus fue la gramínea más productiva. Esta especie también obtuvo más del 80% de su rendimiento máximo con una saturación de aluminio del 86% y 2.3 ppm de P, como resultado de la adición de 0.5 ton de cal/ha para suministrar calcio y magnesio y 17 kg de P/ha. Panicum maximum mostró menor tolerancia global pero un rendimiento absoluto relativamente alto. En las condiciones de Carimagua esta especie requirió niveles relativamente altos de cal y fósforo para alcanzar el 80% de su rendimiento máximo.

Consideradas en grupo, las leguminosas presentadas en el Cuadro 23 fueron, en general, más tolerantes a la acidez y al bajo nivel de fósforo que las gramíneas, excepto por Desmodium heterophyllum, Macroptilium sp. y Leucaena leucocephala. Estos ecotipos murieron a menos que se adicionara 0.5 ton de cal/ha y algo de fósforo. En general, Stylosanthes mostró un mejor comportamiento que los otros géneros.

Dichas valoraciones no garantizan el éxito de un ecotipo tolerante en condiciones de pastoreo. La persistencia y la productividad de una pastura también depende de muchos otros atributos de la planta, incluyendo su capacidad de rebrote, tolerancia a la defoliación, pisoteo, sequía, insectos y enfermedades. Sin embargo, las valoraciones de tolerancia proporcionan un estimado claro sobre los insumos requeridos para superar las limitaciones impuestas por la acidez del suelo.

D. Selección de Variedades Tolerantes al Manganeso

La toxicidad al manganeso es otro factor limitante en ciertos Oxisoles y Ultisoles. Aunque no se conoce su distribución geográfica (Cuadro II), se considera que es menos común que la toxicidad por aluminio. La toxicidad por manganeso ocurre en suelos que presentan altos niveles de manganeso fácilmente reducibles, generalmente con contenidos relativamente altos de materia orgánica que pueden causar condiciones anaeróbicas temporales. El manganeso es muy soluble a valores de pH menores que 5.5, particularmente en condiciones anaeróbicas, en las que el Mn^{4+} se reduce a Mn^{2+} . En Oxisoles y Ultisoles bien drenados pueden ocurrir condiciones anaeróbicas temporales debido a la descomposición

rápida de materia orgánica o a inundaciones temporales durante períodos de lluvia fuerte. Algunos ejemplos de dichos suelos incluyen el suelo arcilloso de Coto, un Tropeptic Eutrorthox de Puerto Rico (Pearson, 1975) y algunos suelos Orthoxic Palehumult en la estación de CIAT Quilichao en Colombia. A diferencia de la toxicidad de aluminio, la toxicidad de manganeso puede ocurrir a niveles de pH tan altos como 6.0 (Simar et al., 1974). Los niveles de cal comunmente requeridos para aumentar el pH de los Oxisoles y Ultisoles tóxicos en manganeso a un nivel de aproximadamente 6, son por lo general muy altos. Por ejemplo, para aumentar el pH de 4.6 a 6.0 en el Ultisol de la estación de CIAT-Quilichao, es necesario aplicar CaCO_3 puro a razón de 20 ton /ha (CIAT, 1978). En consecuencia, la principal estrategia es la de seleccionar variedades tolerantes.

A diferencia de la toxicidad de aluminio, los síntomas de la toxicidad de manganeso, ocurren en las hojas puesto que este elemento tiende a acumularse en las partes aéreas, en tanto que el exceso de aluminio se acumula en las raíces (Foy, 1976b). Los síntomas de toxicidad de manganeso incluyen clorosis marginal, deficiencia de hierro inducida, malformación de hojas jóvenes y manchas localizadas en los sitios en donde se acumula manganeso (Vlamis y Williams, 1973; Foy, 1976b). En términos generales, aparentemente las leguminosas son más susceptibles a la toxicidad del manganeso que las gramíneas (Lohnis, 1951; Hewitt, 1963). Los científicos australianos han encontrado diferencias importantes en la tolerancia al exceso de manganeso entre las principales especies de leguminosas forrajeras. El Cuadro XXIV muestra la clasificación de toleran-

cia al manganeso de las principales leguminosas tropicales australianas según Andrew y Hegarty. Souto y Dobereiner (1969) también encontraron diferencias similares en Oxisoles tóxicos en manganeso del estado de Rio de Janeiro, Brasil. Sus resultados (Cuadro 25) indican que Centrosema pubescens es relativamente tolerante, en tanto que Pueraria phaseoloides es sensible. Los trabajos adelantados por Salinas (sin publicar) muestran resultados opuestos según observaciones visuales en Ultisoles de Quilichao Colombia. Los científicos australianos están adelantando actividades de mejoramiento genético específicamente para incorporar tolerancia al manganeso en Macroptilium atropurpureum, ya que la variedad Siratro ampliamente difundida es relativamente sensible a la toxicidad de este elemento (Hutton et al, 1978).

Es poco lo que se ha hecho para establecer los niveles críticos externos (suelo) o internos (foliar) de la toxicidad del manganeso. Andrew y Hegarty (1969) han establecido niveles críticos internos (Cuadro 24) pero no están acordes con sus clasificaciones de tolerancia. Con base en trabajos preliminares realizados en el CIAT, más de 100 ppm de Mn extraído con KCl-1 N en los primeros 50 cm del suelo podría considerarse como un nivel tentativo de toxicidad de manganeso (Sanchez y Cochrane, 1980). Esta cifra requiere ser validada a nivel local antes de que se pueda considerar como un nivel crítico externo para la toxicidad de manganeso.

E. Conclusiones

A pesar de que cerca del 70% de la extensión de tierra de las regiones de Oxisoles y Ultisoles de América tropical poseen limitaciones severas

por la acidez del suelo, no es necesario encalar estos suelos hasta llevarlos a su nivel neutro o incluso a un pH de 5.5 con el fin de obtener una producción de cultivos y pastos sostenida. Los estimativos de las necesidades de producción de alimentos en el mundo a largo plazo no requieren de altas dosis de aplicación de cal para las 750 millones de hectáreas de América tropical con limitaciones severas por la toxicidad de aluminio, deficiencia del calcio y deficiencia del magnesio. A su vez, son engañosas las aceveraciones que indican que una producción agrícola sostenida es posible sin el encalamiento en la mayoría de los Oxisoles y Ultisoles. La existencia de variedades de especies forrajeras y de cultivos muy tolerantes al aluminio puede eliminar la necesidad de disminuir el nivel de saturación de aluminio del suelo mediante el encalamiento, pero en la mayoría de los casos las plantas requieren de fertilización con calcio y magnesio. Esto se puede lograr mediante aplicaciones de cal en dosis pequeñas o mediante el uso de fertilizantes que contengan suficientes cantidades de estos dos nutrimentos esenciales. Las aplicaciones de cal en pequeñas dosis son probablemente menos costosas por unidad de nutrimento que los fertilizantes de calcio y magnesio.

Un atributo muy positivo de muchos Oxisoles y Ultisoles de América tropical es la relativa facilidad de movimiento del calcio y magnesio en el subsuelo. Es posible aprovechar lo que normalmente se consideraría como un factor limitante del suelo -- su baja ^{CICE,}CEIC. Junto con una estructura del suelo favorable y suficiente lluvia, una baja ^{CICE}CEIC favorece
A

la disminución gradual de las propiedades químicas del subsuelo. Esto a su vez favorece un desarrollo radical más profundo y menos oportunidad de que ocurra estrés por la sequía.

VI. MANEJO DEL FOSFORO

La deficiencia del fósforo es uno de los factores limitantes edáficos más difundidos en América tropical. Aproximadamente un 82% de la extensión de tierras del trópico Americano, presenta deficiencias de fósforo en su estado natural (Cuadro 2). En las sabanas y bosques húmedos de Oxisoles y Ultisoles, el estimativo aumenta al 96% del área (Sánchez y Cochrane, 1980). Los problemas de la deficiencia de fósforo se complican por la alta capacidad de fijación de fósforo, también muy difundida en el medio. Los suelos con una alta capacidad de fijación de fósforo se pueden definir como aquellos que requieren adiciones de por lo menos 200 kg de P/ha con el fin de proporcionar una concentración de equilibrio de 0.2 ppm de P en la solución del suelo (Sánchez y Uehara, 1980). Los suelos ácidos que fijan tales cantidades de fósforo se pueden identificar como aquellos con texturas francas o arcillosas en su capa superficial con una relación de sesquióxidos/arcillas de 0.2 o más, o por la dominancia de alófano en la fracción de arcillas de la capa superficial (Buol et al., 1975). Aproximadamente un 53% de la extensión de tierra de América tropical está dominada por suelos con una alta capacidad de fijación de fósforo como la descrita. En las regiones de Oxisoles - Ultisoles esta cifra aumenta al 72%, pero los suelos con alta capacidad de fijación de fósforo son menos extensivos en la selva Amazónica que en las sabanas (Cochrane y Sánchez, 1981).

La Figura 22 muestra algunos ejemplos de isotermas de absorción de fósforo según el procedimiento de Fox y Kamprath (1970). Entre los

Oxisoles y Ultisoles, la fijación de fósforo generalmente aumenta con el contenido de arcillas debido a su relación directa con el área superficial en donde se localizan los óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio y que son los responsables en gran parte de la fijación del fósforo (Pope, 1976; Lopes y Cox, 1979; Sánchez y Uehara, 1980). La alta fijación de fósforo se considera como una de las principales razones por las cuales extensas áreas de tierras arables en sabanas de América tropical se encuentran subutilizadas (León y Fenster, 1980).

El costo unitario relativamente alto de los fertilizantes fosforados junto con la ampliamente difundida deficiencia y fijación de fósforo, exige que para estos suelos se desarrollen tecnologías de bajos insumos que puedan hacer un uso más eficiente del fósforo aplicado. Salinas y Sánchez, (1976), Fenster y León (1979a,b), León y Fenster (1979a,b, 1980) y Sánchez y Uehara (1980) han sugerido estrategias similares con el fin de desarrollar sistemas de manejo apropiados para el fósforo en cultivos y pasturas de los suelos ácidos e infértiles de América tropical. La estrategia consta ahora de seis componentes principales, cinco de los cuales se encuentran relativamente bien establecidos: (1) la determinación de la combinación más apropiada de métodos y dosis de aplicación para estimular los efectos iniciales y residuales; (2) el mejoramiento de los procedimientos de evaluación de la fertilidad del suelo para hacer recomendaciones de aplicación de fósforo; (3) el uso de fuentes de fósforo menos costosas, tales como las rocas fosfóricas, ya seca solas o en com-

binación con superfosfato; (4) el uso de cantidades moderadas de cal para aumentar la disponibilidad de fuentes solubles de fósforo; (5) la selección de especies y variedades que puedan crecer bien en condiciones de niveles menores de fósforo aprovechable en el suelo; y (6) la exploración de las posibilidades prácticas de las asociaciones de micorrizas para aumentar la absorción del fósforo por las plantas. En las siguientes secciones se discuten estas estrategias.

A. Dosis y Métodos de Aplicación de Fósforo

En América tropical se han hecho investigaciones extensivas para determinar las respuestas óptimas de los cultivos a la fertilización con fósforo en Oxisoles y Ultisoles (Kamprath, 1973). Sin embargo, la mayoría de ellas se limitan a las aplicaciones de superfosfatos al voleo y a su incorporación en la capa superficial del suelo. Aunque este método de aplicación generalmente produce grandes respuestas en rendimiento, tales como las que se presentan en la Figura 2 (sección I, B), las altas dosis requeridas y el método de aplicación no necesariamente son las más eficientes para aplicar fósforo.

1. Cultivos Anuales

Un experimento a largo plazo realizado en un Typic Haplustox con alta capacidad de fijación de fósforo en el Cerrado de Brasil proporciona una comparación de aplicaciones de superfosfato en banda vs. al voleo durante un período suficiente para evaluar en forma adecuada los efectos residuales. La Figura 23 (tomada de datos por NCSU, 1974, 1975, 1976, 1978; CPAC, 1978, 1979, 1980; Yost et al., 1979 y Miranda et al., 1980) muestra

Los resultados de diferentes dosis y métodos de aplicación de superfosfato triple en nueve cosechas de maíz durante un período de 7 años. En contraposición con la opinión convencional, la aplicación en bandas fue inferior a las aplicaciones hechas al voleo para el primer cultivo. Este suelo presentaba tal deficiencia de fósforo que el desarrollo radical se restringió a las áreas de la capa superficial que recibieron fertilización con fósforo. En los cultivos posteriores este efecto desapareció a medida que las aplicaciones en bandas se mezclaron con el resto de la capa superficial del suelo por las operaciones de labranza.

Considerando los efectos a largo plazo, el rendimiento promedio de grano más alto de 6.3 ton/ha se obtuvo mediante la aplicación masiva al voleo de 1200 kg P_2O_5 /ha incorporándolos en la capa superficial del suelo antes de la primera siembra. El efecto residual fue suficiente para mantener el nivel de fósforo aprovechable en el suelo por encima del nivel crítico para el maíz de 10 ppm de P (mediante la extracción de Mehlich 2) durante 7 años. Los cálculos económicos adelantados por Miranda *et al.* (1980) también indican que esta estrategia de altos insumos es la más rentable entre las estudiadas en este experimento, presuponiendo una tasa de interés anual del 25% para el crédito otorgado para comprar el fertilizante y una relación promedio de precios:costos en la que se requieren 6.7 kg de maíz para pagar un kg de P_2O_5 en la forma de superfosfato triple.

La alta inversión de capital y las implicaciones en el suministro mundial de fertilizantes indican que se deben buscar otras alternativas. La división de la dosis de 1280 kg P_2O_5 /ha en cuatro aplicaciones en banda

de 320 kg de P_2O_5 /ha a los primeros cuatro cultivos produjo un 97% del rendimiento máximo; por consiguiente, la eficiencia de utilización del fertilizante no fue afectada por este motivo. Sin embargo, esta alternativa tiene la desventaja de que se obtienen rendimientos iniciales bajos, pero tiene la ventaja de que el fósforo se compra en forma dividida durante un período de 4 años. Una aplicación gradual similar en bandas durante 4 años para un total de 640 y 320 kg de P_2O_5 /ha produjo un 64 y 51% del rendimiento máximo, respectivamente. Estos tratamientos tuvieron un comportamiento similar a las aplicaciones iniciales al voleo de 640 y 320 kg de P_2O_5 /ha (Fig. 23B). Los beneficios incluyen mayores rendimientos iniciales con las aplicaciones al voleo en lugar de un aumento gradual en el rendimiento y un efecto residual más efectivo con las aplicaciones en bandas.

Las combinaciones de las aplicaciones al voleo y en bandas (Fig. 23C) parecen ser más promisorias. Una aplicación inicial al voleo de 320 kg de P_2O_5 /ha seguida por cuatro aplicaciones en bandas de 80 kg P_2O_5 /ha produjo un 79% del rendimiento máximo como promedio de las nueve cosechas. Miranda *et al.* (1980) indicaron que el beneficio económico de esta estrategia era similar a la aplicación al voleo de 1280 kg de P_2O_5 /ha una sola vez, pero la cantidad total de fósforo adicionada se redujo a la mitad. Otra posibilidad es aplicar al voleo una cantidad mínima de 80 kg de P_2O_5 /ha y aplicar la misma cantidad en bandas a todos los cultivos, incluyendo el primero. Esta estrategia produjo un 75% de los rendimientos máximos, pero la inversión total en fósforo durante las nueve cosechas aumentó

a 800 kg de P_2O_5 /ha.

Las combinaciones al voleo y en bandas tienen la ventaja adicional de dar una mayor estabilidad en el rendimiento que las aplicaciones solas al voleo o en bandas. En retrospectión, un tratamiento más efectivo podría haber sido una aplicación inicial al voleo de 160 kg de P_2O_5 /ha seguida por una aplicación en bandas de 80 kg de P_2O_5 /ha a todos los cultivos. Esto hubiera reducido la inversión total a 640 kg de P/ha para los nueve cultivos, hubiera producido un 75-80% del rendimiento máximo y hubiera evitado inversiones iniciales grandes de capital. Considerando la alta capacidad de fijación de fósforo de este suelo (780 ppm de P o 3545 kg de P_2O_5 /ha para alcanzar una concentración de P en la solución del suelo de 0.2 ppm, Fig. 22, como el Oxisol de Brasil), las estrategias de aplicación al voleo—en banda son ejemplos de la manera como se pueden disminuir los insumos de fertilizantes fosforados mediante una combinación más racional de dosis y métodos de aplicación, con suficiente tiempo para evaluar los efectos residuales.

2 . Pasturas

Las consideraciones sobre las dosis y los métodos de aplicación de los fertilizantes fosforados son básicamente diferentes en el caso de pasturas en estos suelos con alta capacidad de fijación de fósforo. Las principales razones incluyen las menores dosis de fósforo requeridas por las pasturas tolerantes a la acidez, la falta de operaciones posteriores de labranza que mezclan el fósforo aplicado en la capa superficial del

suelo y un mecanismo de reciclaje de nutrimento por medio de los excrementos de los animales en condiciones de pastoreo. La Figura 24 muestra un patrón de respuesta completamente diferente para las especies de pasturas adaptadas a las aplicaciones de superfosfato al voleo en un Ultisol de Quilichao, Colombia, con una capacidad de fijación de fósforo similar a la del Oxisol de Brasilia mencionado en el ejemplo anterior. La Figura 22 indica que la cantidad de fósforo adicionada para mantener una concentración de P en la solución del suelo de 0.2 ppm es similar en ambos suelos (650 ppm de P para el Ultisol de Quilichao y 760 ppm de P para el Oxisol de Brasilia). Los cultivos anuales sembrados en el Ultisol de Quilichao requieren aproximadamente 400 kg de P_2O_5 /ha para acercarse a sus rendimientos máximos. Especies de pasturas tales como Panicum maximum, Andropogon gayanus y Centrosema pubescens requieren aproximadamente 80 kg de P_2O_5 /ha en una sola aplicación incorporada al voleo para acercarse a la máxima producción de materia seca durante los primeros 2 años (Fig. 24). En el Oxisol de Carimagua con una capacidad de fijación de fósforo considerablemente menor (400 ppm de P para alcanzar una concentración en la solución del suelo de 0.2 ppm, como se ilustra en la Fig. 22), especies adaptadas tales como Brachiaria decumbens solamente requieren 50 kg de P_2O_5 /ha en la forma de superfosfato triple para alcanzar su máxima producción (Fig. 25). A unos niveles de aplicación tan bajos como éstos, el método en bandas es definitivamente superior a la aplicación al voleo e incorporado para el establecimiento de pasturas, especialmente si la siembra también se

hace en bandas, (CIAT, 1978; Fenster y León, 1979b). Las especies de pasturas presentan su máximo requerimiento de fósforo unas cuantas semanas después de la germinación antes de que se desarrolle un sistema radical profundo (Salinas, 1980). En consecuencia, es importante asegurar que las plántulas tengan una fuente cercana de fósforo. La aplicación en bandas también disminuye el crecimiento de malezas entre las hileras en estos Oxisoles (Spain, 1979).

Después de que una pastura esté bien establecida, las aplicaciones de fósforo de mantenimiento se pueden hacer al voleo sobre la superficie del suelo sin incorporación (NCSU, 1976). Esto permite el uso de dosis más bajas puesto que se minimiza el contacto con el suelo de alta capacidad de fijación del fósforo. A pesar de que no se tiene un buen conocimiento sobre la forma como las especies de pasturas utilizan el fósforo colocado sobre la superficie del suelo, aparentemente las raíces superficiales son capaces de absorberlo y utilizarlo en forma eficiente.

B. La Necesidad de Mejorar los Procedimiento de Evaluación de la Fertilidad de los Suelos

Otra manera de aumentar la eficiencia de la fertilización fosforada es utilizar mejores métodos para determinar las recomendaciones de fertilización. El objeto es identificar el requerimiento inicial de fósforo de una especie o variedad determinada ya sea en términos del fósforo disponible en el suelo (nivel crítico externo) o el contenido foliar de fósforo (nivel crítico interno). Estos niveles críticos son los neces-

sarios para proporcionar un nivel adecuado de materia seca, definido en esta revisión como un 80% del nivel máximo. La utilización de los diagramas de Cate-Nelson(1972) y el modelo de respuesta lineal y de la meseta, descrito en la Sección I,B,2 son relativamente útiles para el fósforo, en tanto que la utilización de los modelos de respuesta cuadrática tienden a exagerar las dosis óptimas de aplicación del fertilizante (Anderson y Nelson, 1975)

Dadas las limitaciones de fijación de fósforo en estos suelos, es tentador usar estimativos de fijación de fósforo como guías para las dosis de fósforo que se deben aplicar. El enfoque más común es extrapolar de las isotermas de absorción de fósforo la cantidad de fósforo que debe ser adicionada para alcanzar el nivel deseado en la solución del suelo (Fox et al., 1971, 1974). Fox y sus compañeros de trabajo definieron al nivel de la solución del suelo que al extrapolar al campo producía un 95% del rendimiento máximo, como el "requerimiento crítico externo del fósforo"; el rango de este nivel crítico oscila entre 0.05 y 0.6 ppm de P para varias especies (Fox et al., 1974).

El cuadro 26 muestra la cantidad de superfosfato que es necesario aplicar al voleo para mantener niveles específicos en la solución del suelo en el campo y sus equivalencias en términos de tres métodos comunes de ensayo del suelo. El suelo en el cual se obtuvieron los datos del Cuadro 26 es un Tropeptic Eutrorthox arcilloso con una alta capacidad para fijar fósforo (350 ppm de P aplicado para alcanzar una concentración de 0.2 ppm en la solución del suelo).

Al aplicar este enfoque en Oxisoles y Ultisoles de América tropical, se ha encontrado que se exageran las recomendaciones respecto a la dosis de fósforo en una cantidad significativa (Novais y Kamprath, 1979; Smyth y Sanchez, 1980b; Sanchez y Uehara, 1980; Fenster y León, 1979a,b). La razón principal se encuentra en el Cuadro 26. Con base en el enfoque de Cate-Nelson, los niveles críticos de pruebas de suelos para cultivos de granos en América Latina, son del orden de 8-15 ppm de P mediante las extracciones que se ilustran en el cuadro (Cano, 1973; Kamprath, 1973; Miranda et al., 1980). Niveles en la solución del suelo tan bajos como 0.025 ppm de P producen valores de pruebas de suelo muy por encima de los niveles críticos de pruebas del suelo que se han desarrollado mediante una calibración apropiada.

Además, es extremadamente difícil establecer niveles críticos de unas pocas partes por billón que frecuentemente correspondan al rango agrónomicamente adecuado en dicho suelo. Las isotermas de Langmuir y Freundlich son difíciles de extrapolar en este rango. Además, las bajas concentraciones se aproximan a los límites de detección de los espectrofotómetros convencionales.

Al considerar bajos niveles de adición de fertilizantes fosforados (50-150kg de P_2O_5 /ha) las isotermas de absorción son de poco valor (Fenster y León, 1979a,b). Por ejemplo, la Figura 22 muestra que el Oxisol de Carimagua fija grandes cantidades de fósforo aplicado (400 ppm de P o 1818 kg de P_2O_5 /ha para alcanzar una concentración de P en la solución

del suelo de 0.2 ppm). Sin embargo, después de 4 años de cultivo continuo de Brachiaria decumbens, una aplicación inicial de 50 kg de P_2O_5 /ha en la forma de superfosfato triple produjo un 79% del rendimiento máximo obtenido con la dosis de 400 kg de P_2O_5 /ha (Cuadro 27). En dosis tan bajas, los procedimientos convencionales de extracción del suelo con frecuencia no reflejan la cantidad de fertilizante fosforado adicionado. El Cuadro 28 muestra los aumentos muy pequeños de fósforo aprovechable Bray II cuando un Oxisol recibió 0-100 kg de P_2O_5 /ha en incrementos de 20 kg. Esto dificulta hacer recomendaciones de fertilizantes fosforados solamente con base en pruebas de suelos. Se han iniciado algunos estudios para mejorar la sensibilidad de las pruebas de suelos existentes (CIAT, 1980). La Figura 26 muestra que al aumentar las concentraciones de NH_4F en el extractor Bray, el cual aumenta los valores de fósforo disponible, se refleja el fósforo absorbido que está disponible para la planta (CIAT, 1981). Como el NH_4F es capaz de extraer parte del fósforo ligado al aluminio y al hierro, estas fracciones pueden desempeñar una función importante en la liberación del fósforo para las plantas, tal vez mediante excreciones radicales o actividad microbiana. El Cuadro 28 muestra las fracciones de fósforo del Oxisol de Carimagua en función de las dosis de fósforo. Los aumentos en el fósforo ligado al calcio y aluminio contribuyen a un aumento en el fósforo disponible, pero parte de las grandes cantidades de fósforo ligado al hierro pueden tener alguna influencia en la disponibilidad del fósforo. Por consiguiente, las plantas que se encuentran con bajas dosis de fósforo aplicado, parecen extraer fósforo de

estas fracciones en una forma que las pruebas convencionales de suelos no son capaces de detectar.

Cuando el fósforo se aplica en bandas, la interpretación de las pruebas de suelo se tornan aún más difíciles. Una posibilidad es utilizar análisis de tejidos, puesto que la planta es la última que evalúa la fertilidad del suelo. En los casos en que los niveles críticos internos se encuentren disponibles y estandarizados en forma apropiada en términos de las partes de la planta y su edad, se pueden utilizar los análisis de tejidos.

Otro enfoque puede ser interpretar los datos de las pruebas de suelo de muestras entre las bandas en la forma como se describe en la Figura 27, en la cual las respuestas en rendimiento de la soya se encuentran en la gráfica en función de los valores de pruebas de suelo obtenidos en experimentos que incluyen diferentes combinaciones de aplicaciones al voleo y en bandas.

En los casos en que se disponga de datos de respuestas de campo, la recomendación de fertilizantes con base en pruebas de suelo tienen la ventaja de estar calibradas con respuestas conocidas de campo. El Cuadro 29 muestra las recomendaciones iniciales de aplicación al voleo y en bandas anualmente para los Oxisoles arcillosos cerca de Brasilia, con base en los datos presentados en la Figura 23. Este cuadro muestra una dosis decreciente de las aplicaciones al voleo, al aumentar el nivel de las pruebas de suelos.

C. Utilización de Fuentes de Fósforo Menos Solubles

Un tercer componente de la estrategia de manejo de bajos insumos de fósforo, es utilizar los abundantes depósitos de rocas fosfatadas presentes en el trópico de América del Sur presentados en la Figura 28. Todos estos depósitos, excepto dos, se clasifican como materiales de baja reactividad considerados como no aptos para su aplicación directa (Lehr y McClellan, 1972). La roca de Bayóvar se considera de alta reactividad y la roca del Huila, de reactividad intermedia (Chien y Hammond, 1978; León y Fenster, 1979b).

1. Comparaciones Entre Fuentes

El Cuadro 30 muestra la efectividad agronómica de diferentes rocas fosfóricas en comparación con el superfosfato triple, utilizando Panicum maximum como pastura de prueba en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. Las rocas fosfóricas de alta reactividad tales como las de Carolina del Norte, Bayóvar y Gafsa presentaron un comportamiento muy similar al superfosfato triple. Las rocas fosfóricas de reactividad intermedia tales como las del Huila y Florida, e incluso la gama de materiales de baja reactividad provenientes de Brasil, Colombia y Venezuela, parecen promisorias para su aplicación directa en los suelos ácidos.

La efectividad de las rocas fosfóricas en estos suelos depende de su solubilidad, finura, tiempo de reacción y pH del suelo (Khaswahneh y Doll, 1978). En estos suelos altamente ácidos, incluso las rocas fosfóricas de baja reactividad son efectivas con el tiempo. El Cuadro 28

muestra los resultados de un experimento realizado en un Oxisol de Carimagua con Brachiaria decumbens, en el cual se compararon seis rocas fosfóricas de efectividades agronómicas variables con superfosfato triple (León y Fenster, 1980). Este estudio incluyó dosis de aplicación entre 0 y 400 kg de P_2O_5 /ha al voleo e incorporadas. Después de casi 4 años, los rendimientos de forrajes de los tratamientos con rocas fosfóricas fueron comparativamente favorables a los tratamientos con superfosfato triple. En muchos casos, los rendimientos con rocas fosfóricas fueron considerablemente mayores. Durante el período de tiempo en que se realizó este experimento, la dosis de 50 kg de P_2O_5 /ha pareció ser la adecuada en condiciones de campo.

Se han registrado resultados similares en un experimento de campo realizado en Ultisoles de Pucallpa y Yurimaguas, Peru (NCSU, 1974; Cano et al., 1978; León y Fenster, 1980) y en un Oxisol de Brasilia, Brasil (NCSU, 1975, 1976; Miranda et al., 1980). En este último caso, la mayor capacidad de fijación de fósforo aumentó la dosis requerida a aproximadamente 200 kg de P_2O_5 /ha. Durante el primer año de aplicación, la utilización de la roca fosfórica de Araxá de baja reactividad en Brasilia tuvo poco efecto en el crecimiento de Brachiaria decumbens.

2. Tamaño de las Partículas de Materiales de Rocas Fosfóricas

La efectividad de las rocas fosfóricas aumenta entre mayor sea la finura de las partículas, a diferencia de las fuentes solubles en agua (Terman y Englestad, 1972). Desde un punto de vista práctico, las ro-

cas fosfóricas finamente molidas presentan problemas serios de manejo y aplicación que limitarían al agricultor o al distribuidor de fertilizantes en lo que respecta al uso difundido de las rocas fosfóricas. Para resolver el problema, el International Fertilizer Development Center inició un estudio para determinar si la roca fosfórica finamente molida podría ser granulada y aún retener su efectividad agronómica. Se realizaron experimentos preliminares de invernadero utilizando diferentes dosis y tamaños de granulos de rocas fosfóricas; los resultados se presentan en la Figura 29. Los minigránulos (tamiz -48 + 150) probaron tener la misma efectividad agronómica que la roca fosforica finamente molida. Aparentemente, cuando estos "minigránulos" entraron en contacto con el suelo, se disolvió el KCl aglutinante. Por consiguiente, su área superficial efectiva es similar a la de los materiales finamente molidos. Aunque los gránulos de mayor tamaño (tamiz - 6 + 16) no fueron inicialmente tan efectivos, con el tiempo liberaron cantidades crecientes de fósforo (CIAT, 1980, 1981).

3. Aplicaciones Antes del Encalamiento en Cultivos Sensibles a la Acidez

Las rocas fosfóricas requieren un ambiente ácido en el suelo con el fin de liberar fósforo hacia la solución del suelo. En algunos suelos ácidos de América tropical, la efectividad de las rocas fosfóricas altamente reactivas disminuye si el pH del suelo es superior a 5.0 (Lathwell, 1979). Esto generalmente no representa un problema para la mayoría de los pastos tolerantes al aluminio, pero puede inhibir el crecimiento de variedades de cultivos sensibles al aluminio. En términos de la producción de

cultivos, una de las alternativas es aplicar la roca fosfórica varios meses antes del encalamiento con el fin de que reaccionen a un bajo pH. Este procedimiento es especialmente ventajoso si el primer cultivo que se va a sembrar es relativamente tolerante al aluminio, como en el caso del arroz seco. La cal se puede aplicar entonces antes de la siembra de un cultivo más sensible al aluminio, como el maíz. El tiempo requerido para que la cal reaccione en suelos ácidos es menos que el requerido para que las fuentes de roca fosfórica de alta solubilidad reaccionen (Sanchez y Uehara, 1980).

4. Combinación con Fuentes más Solubles

Una alternativa adicional es aplicar las rocas fosfóricas al voleo y aplicar fuentes de fósforo más soluble en bandas con el fin de proporcionar fósforo mientras que la roca fosfórica se disuelve lentamente. Smyth (1981) y el CPAC (1980) han demostrado que la aplicación al voleo de 200 kg de P_2O_5 /ha de rocas fosfóricas de Patos de Minas de baja reactividad más las aplicaciones anuales en bandas de superfosfato simple producen rendimientos de soya similares a los obtenidos con la misma dosis suministrada totalmente en la forma de superfosfato simple.

El Cuadro 31 muestra que cuando se aplican diferentes combinaciones de roca fosfórica con superfosfato simple o triple, la respuesta inicial del crecimiento del maíz en un Oxisol de Colombia es proporcional a la cantidad de fósforo soluble en la mezcla de fertilizantes (Fenster y León, 1979a,b). Las comparaciones entre roca fosfórica minigranulada en combinación con superfosfato triple o superfosfato simple y estas fuentes

solubles de fósforo aplicadas solas, muestran que los materiales granulados son superiores en todos los casos. Estos resultados indican que el ácido producido por el fósforo soluble en el gránulo puede estar reaccionando con las rocas fosfóricas, la cual está liberando fosforo adicional para las plantas.

5. Acidulación Parcial

De los puntos discutidos con anterioridad, es evidente que muchas rocas fosfóricas, aunque con un buen comportamiento con el tiempo, son inferiores inicialmente a las fuentes más solubles de fósforo para la producción de cultivos y ciertos pastos. El trabajo adelantado por McLean y Wheeler (1964) indica que la acidulación parcial de la roca fosfórica a niveles del 10 o 20% puede superar este problema. La roca fosfórica parcialmente acidulada podría proporcionar una fuente soluble de fósforo inicialmente y todavía mantener el valor residual de la roca fosfórica (Hammond et al., 1980). Howeler (CIAT, 1979) ha obtenido resultados muy satisfactorios con frijol. Estudios realizados en un Oxisol de Carimagua han mostrado que la acidulación parcial con H_2SO_4 de rocas fosfóricas colombianas de baja reactividad mejoraron, en efecto, los rendimientos en comparación con las rocas fosfóricas de Carolina del Norte y Florida (Mokwunye y Chien, 1980). Sin embargo, estimativos recientes del IFDC indican que el costo por unidad de P de rocas fosfóricas parcialmente aciduladas es igual al del superfosfato.

6. Alteraciones Térmicas

Otro grupo de fuentes potencialmente más baratas de fósforo para los suelos ácidos con alta capacidad de fijación de fósforo incluyen la Escorias

Thomas y fosfatos de magnesio fundidos, ambos productos insolubles en agua provenientes de alteraciones térmicas. Este tipo de fertilizantes ha sido usado principalmente en Europa, pero su potencial en las áreas tropicales con problemas de fijación de fósforo está recibiendo mayor atención, especialmente porque las industrias del acero se desarrollan en donde existen fuentes de energía más baratas.

La Escorias Thomas es un subproducto de la manufactura de acero a partir de mineral de hierro rico en fósforo. Presenta un contenido promedio de fósforo de 4-8% y calcio de 32%, principalmente en la forma de silicofosfato de calcio y silicatos de calcio. Se ha encontrado que presenta igual o mayor efectividad que los superfosfatos en las mismas dosis de aplicación de fósforo en Oxisoles de Brasil y Colombia (Spain, 1979; Sanchez y Uehara, 1980).

Los fosfatos de Rhenania se producen mediante la fundición de rocas fosfóricas de baja solubilidad en citrato con sílice y ceniza de soda. Cuando se funde serpentina o silicatos de magnesio para obtener silicofosfatos de calcio o magnesio, los productos se denominan en Brasil fosfatos de magnesio fundidos o termofosfatos. Estos productos varían en su composición, en rangos de 10-12% de P, 20-30% de Ca y 0.8% de Mg. Se ha encontrado que son tan efectivos o más efectivos que los superfosfatos en Oxisoles y Ultisoles con alta capacidad de fijación de fósforo, especialmente si éstos no han sido encalados (NCSU, 1976; CPAC, 1980; Sánchez^Z y Uehara, 1980).

Los experimentos que se están realizando en Oxisoles de Brasilia indican que una aplicación de 152 kg de P/ha en la forma de Termofosfato disminuyó la saturación de aluminio del 70 al 38%, en tanto que no se observó un cambio equivalente con una dosis igual de superfosfato triple que produjo rendimientos similares de pastos (NCSU, 1976, 1978; CPAC, 1979, 1980).

La principal desventaja de los fosfatos de Rhenania es su alto costo de producción. Por ejemplo, el precio por kilogramo de P en Brasil es casi igual al del superfosfato triple. A pesar de que el efecto de encalamiento y el contenido de sílice hace que su uso sea más rentable, un factor limitante primordial de los fosfatos de Rhenania es su alto costo. Es posible que la situación sea diferente en regiones con un amplio suministro de energía hidroeléctrica para la alteración térmica.

La producción de fosfatos térmicamente alterados es a veces adecuada para plantas pequeñas de fertilizantes que emplean tecnología intermedia. A pesar de que en las naciones industrializadas no es factible tener plantas de fertilizante con una capacidad de producción tan baja como 50,000 ton/año, es posible que los países en desarrollo encuentren rentable y apropiado utilizar tecnología intermedia que dependa de la utilización de fuentes y habilidades locales (Sanchez y Uehara, 1980). A diferencia de los superfosfatos, los fosfatos térmicamente alterados no requieren de plantas de azufre o de ácido sulfúrico. Además, las rocas fosfóricas con un alto contenido de sílice se pueden utilizar para su alteración térmica.

D. Disminución de la Fijación de Fósforo con el Encalamiento

El tercer componente de esta estrategia de bajos insumos, es disminuir la capacidad de fijación de fósforo de estos suelos ácidos mediante la aplicación de enmiendas tales como cal y silicatos. Existe mucha controversia con respecto a si el encalamiento disminuye la fijación de fósforo o no (Amarasiri y Olsen, 1973; Pearson, 1975). Parte de este problema se le atribuye a reacciones del fósforo adicionado con hidróxido de hierro y aluminio recién precipitados. Por consiguiente, los efectos de la cal en la disponibilidad de fósforo, pueden depender del grado en que el fósforo sea fijado por las superficies absorbentes o por reacciones con aluminio intercambiable (Smyth y Sánchez, 1980a). Varios estudios con suelos ácidos en América tropical mostraron que al neutralizar el aluminio intercambiable mediante el encalamiento, disminuyó la fijación de fósforo (Mendez y Kamprath, 1978; Leal y Velloso, 1973a,b; Vasconcellos *et al.*, 1975).

El Cuadro 32 muestra los resultados de Smyth y Sanchez (1980a) en Oxisoles de Brasil en los cuales se aplicó cal, silicatos y mezclas de cal y silicatos en dosis agronómicas, en un intento por disminuir la fijación de fósforo. Todos los tratamientos con enmiendas disminuyeron la fijación de fósforo en aproximadamente un 20-30% de los tratamientos que no recibieron fósforo. Estos resultados implican que es necesario hacer una determinación de las cantidades de fósforo requeridas para obtener una concentración determinada en la solución del suelo después de las aplicaciones de cal o silicatos y después de que se le haya permitido suficiente

tiempo para reaccionar; de lo contrario, los requerimientos de fósforo se sobreestimarán (Smyth y Sánchez, 1980a). En el caso de utilizar pruebas de suelos como base para las recomendaciones de fertilizantes, se podrían lograr mejoras si se toman muestras después de que la cal haya reaccionado.

El encalamiento tiene poco o ningún efecto en la disminución de la fijación de fósforo en suelos con valores de pH de 5-6. Aunque siguen siendo ácidos, estos suelos presentan niveles de saturación de aluminio inferiores al 45% (Sánchez y Uehara, 1980; Leal y Velloso, 1973b). Además, el encalamiento a valores de pH cercanos o por encima de 7.0 pueden aumentar en vez de disminuir la fijación de fósforo debido a la formación de fosfatos de calcio relativamente insolubles (Sánchez y Uehara, 1980). En consecuencia, el efecto de la cal en la fijación de fósforo depende de los niveles de pH.

E. Selección de Variedades Tolerantes a Bajos Niveles de Fosforo Aprovechable en el Suelo

Un quinto componente de la estrategia de manejo de bajos insumos de fósforo es seleccionar especies o variedades de plantas que presenten un buen desarrollo y buena producción (aproximadamente un 80% de los rendimientos máximos) con bajos niveles de fósforo aprovechable en el suelo. A pesar de que la selección de germoplasma por "eficiencia en utilización de fósforo" o "tolerancia a bajos niveles de fósforos" se encuentra menos avanzada que para la toxicidad al aluminio, en América tropical también se está realizando investigación con este objetivo.

1. Cultivos Anuales

Salinas (1978) seleccionó una serie de variedades comerciales de arroz seco, maíz y frijol, por su tolerancia a baja disponibilidad de fósforo en el Cerrado del Brasil. La Figura 30 muestra los resultados con arroz expresados en rendimientos relativos en comparación con una alta dosis de aplicación de superfosfato al voleo (1363 kg de P_2O_5 /ha). Esta dosis proporcionó un alto nivel de fósforo aprovechable en el suelo (26 ppm de P mediante la extracción de Mehlich 2). La mayoría de las variedades de arroz produjeron rendimientos máximos en la alta dosis de fósforo al suelo, pero a diferentes niveles de saturación de aluminio. Cuando la saturación de aluminio disminuyó al 63%, mediante la adición de 0.5 ton de cal/ha, proporcionando principalmente calcio y magnesio, las primeras tres variedades de arroz (Batatais, Flotante y IAC-1246) no alcanzaron el 80% del rendimiento máximo como sí ocurrió con IAC-47 y Pratão Precoce. Esta última variedad presentó el requerimiento externo de fósforo más bajo (10 ppm de P) en condiciones de estrés de aluminio.

Cuando la saturación de aluminio se redujo al 38% mediante la adición de 1.5 ton de cal/ha, las variedades de arroz Flotante y IAC-1246 produjeron el 80% de rendimiento máximo, pero con una diferencia significativa en sus requerimientos externos de fósforo. La variedad Flotante requirió casi cuatro veces más de fósforo aprovechable que la variedad IAC-1246. Por otra parte, IAC 47 y Pratão Precoce disminuyeron en cuanto a sus requerimientos externos de fósforo, lo cual indica una mejor utilización de

este elemento en bajas dosis cuando se reduce la toxicidad por aluminio. Las implicaciones económicas de estos resultados indican un equilibrio entre la cal y el fósforo. Utilizando 1.5 ton de cal/ha se podría disminuir el requerimiento de fósforo. Es factible que la cal continúe siendo más barata que los fertilizante fosforados.

En condiciones en las que no se presentó estrés por aluminio, todas las variedades de arroz se aproximaron al 80% del rendimiento máximo, pero a diferentes niveles de fósforo aprovechable. La variedad Flotante siempre requirió más fósforo aprovechable para dar una buena producción, en tanto que Pratão Precoce logró producir más del 80% del rendimiento máximo con una sexta parte de la dosis de fósforo.

La Figura 31 muestra una tendencia similar con las variedades de maíz, pero en todos los casos el requerimiento externo de fósforo fue mayor que para las variedades de arroz. Estos resultados también confirman la observación general de que las dosis recomendadas de fósforo para arroz seco son mucho más bajas que para las de maíz en América Latina (Kamprath, 1973). En condiciones de estrés de aluminio (63% de saturación de aluminio) las variedades de maíz Yellow Carimagua y Agrocerec-152 se aproximaron al 80% de su rendimiento máximo. Cuando la saturación de aluminio disminuyó al 38% mediante la adición de 1.5 ton de cal/ha, las cinco variedades de maíz presentaron un menor requerimiento externo de fósforo para alcanzar el 80% de su rendimiento máximo. Esta observación enfatiza la función importante que desempeña la cal en la eficiencia de la fertilización con fósforo.

También, parece que el encalamiento de este Oxisol con 1.5 ton/ha permitió que las plantas de maíz utilizaran en forma más eficiente tanto el fósforo nativo como el fósforo aplicado (Salinas, 1978).

Las Figuras 32 y 33 también muestran las respuestas diferenciales de variedades de frijol y trigo. Con excepción de la variedad Rico Pardo, las variedades de frijol presentaron menores requerimientos externos de fósforo, ya que el aluminio se neutralizó mediante encalamiento. Además, las variedades se comportaron diferente en cuanto a su requerimiento de fósforo con el mismo nivel de estrés de aluminio.

En el caso de variedades de trigo (Fig. 33), las variedades mejicanas Sonora y Jupateco, las cuales se desarrollaron en suelos calcáreos, solamente produjeron rendimientos significativos en condiciones en las que no existió estrés por aluminio y presentaron mayores requerimientos de fósforo que los de las variedades de trigo de Brasil BH-1146 y IAC-5. A pesar de que IAC-5 presentó un alto requerimiento externo de fósforo, fue la única variedad de trigo que produjo un 80% de su rendimiento máximo en condiciones de estrés por aluminio. A medida que disminuyó el estrés por aluminio, disminuyeron los requerimientos externos de fósforo de todas las variedades.

2. Pastos

Se están obteniendo resultados similares con gramíneas y leguminosas tropicales (CIAT, 1977, 1978, 1979, 1980). Los Cuadros XXXIII y XXXIV muestran los requerimientos internos y externos de fósforo de varias gramíneas y leguminosas tropicales. Los datos indican diferencias considerables en-

tre ecotipos en lo que respecta a sus requerimientos internos y externos de fósforo. En diferentes ecosistemas de América tropical se está logrando un excelente establecimiento de pastos con bajos niveles de fertilizantes fosforados y la utilización de gramíneas y leguminosas adaptadas a las condiciones de suelos ácidos e infértiles (CIAT, 1980).

F. Utilización Potencial de Asociaciones Más Efectivas de Micorrizas

Se ha establecido que varios géneros y especies de micorrizas vesiculares-arbusculares forman asociaciones simbióticas con raíces de ciertas plantas y, como resultado de ello, ocurre un aumento en la absorción de fósforo de suelos con bajos niveles de este elemento (Sanders *et al.*, 1975). Muchas de las especies consideradas en esta revisión como tolerantes a los factores limitantes de los suelos ácidos presentan asociaciones con micorrizas en Oxisoles y Ultisoles: caupí, yuca, cítricos, guayaba, Brachiaria decumbens, Centrosema pubescens, Pueraria phaseoloides, Stylosanthes guianensis, soya y otras (CPAC, 1979, 1980; Waidyanatha *et al.*, 1979; Yost y Fox, 1979). Parece razonable especular que la habilidad para entrar en asociaciones con micorrizas puede ser una característica importante de especies y variedades adaptables a sistemas con bajos insumos.

La ventaja de la asociación con micorrizas radica en la utilización de las hifas del hongo como extensión del sistema radical de las plantas, lo cual resulta en una área superficial mayor para la absorción de nutrientes y la toma de nutrientes que se mueven principalmente por difusión

(fósforo, cinc y otros) en un volúmen de suelo más grande. No hay evidencias de que las asociaciones de micorrizas sean capaces de utilizar formas de fósforo del suelo que de otra manera no estarían disponibles (Mosse et al., 1973); sin embargo, el aumento en la absorción de fósforo no solamente puede resultar en un aumento en el crecimiento y en la concentración de fósforo, sino también en un aumento en la nodulación y fijación de nitrógeno en leguminosas. El Cuadro 35 muestra los resultados de la inoculación con y sin la adición de rocas fosfóricas de alta reactividad en el crecimiento de Pueraria phaseoloides en un suelo ácido laterítico en Sri Lanka, con un pH de 4.5 y 4 ppm de fósforo aprovechable (Bray II). Las infecciones por micorrizas produjeron todos estos efectos favorables y, además, aumentaron la eficiencia de una aplicación de 12 ppm de P en la forma de roca fosfórica de Jordania, comparable a la aplicación de 60 ppm de P sin micorrizas.

En un Oxisol de Hawaii, Yost y Fox (1979) compararon la respuesta de campo de varios cultivos al fósforo, mediante la fumigación de parte de las parcelas y dejando el resto en su estado natural. Como la fumigación eliminó a la mayor parte de la población de micorrizas, su importancia se evaluó en términos de la respuesta al fósforo. Encontraron que las micorrizas influyeron en la absorción de fósforo, no solamente en los bajos niveles de fósforo aprovechable, sino hasta niveles del orden de 0.1 ppm de P en la solución para soya, 0.2 para caupí y 1.6 o más para Stylosanthes hamata, Leucaena leucocephala y yuca. A niveles bajos de fósforo aprovechable (0.003 ppm de P en la solución o 3 ppm de P Bray I), en promedio, la absorción de fósforo fue 25 veces mayor en plantas con micorrizas que en plantas sin micorrizas.

Los estimativos de los niveles críticos internos o externos de fósforo, en ausencia de las asociaciones con micorrizas, tales como las que se hicieron en cultivos en arena, soluciones nutritivas o suelos fumigados, pueden ser exagerados. Yost y Fox (1979) estiman que el requerimiento de fósforo de la yuca puede ser exagerado en un factor de 100 veces si se estima en ausencia de micorrizas.

El problema con datos como estos es que solamente documentan sobre lo que está ocurriendo en Oxisoles y Ultisoles en condiciones naturales, en donde las cepas nativas de micorrizas ya están actuando. Aunque esta información da mucha luz, no produce una nueva práctica de manejo. Lo que se requiere es determinar si la inoculación con cepas más efectivas de micorrizas puede estimular la absorción de fósforo. Para llegar a una determinación, es necesario responder a dos interrogantes: (1) en la práctica, cómo se pueden inocular las micorrizas? (2) Existen cepas más efectivas que puedan competir con las nativas y persistir en el suelo?

A diferencia de la inoculación de rizobios, las micorrizas se deben inocular en la forma de hifas frescas y no se pueden mezclar con turba y después secar. A nivel experimental, la inoculación de campo se puede hacer mediante la adición de suelo proveniente de áreas con micorrizas, pero el volumen requerido impediría su aplicación práctica. Se están haciendo avances para responder al segundo interrogante. Los investigadores en el Centro del Cerrado cerca de Brasilia (CPAC, 1980) lograron producir una buena infección con la especie de micorriza Anaulospora laevis en el cultivar de soya UFV-1 tolerante a la acidez en un Oxisol. Se re-

quiere más investigación al respecto antes de que las micorrizas puedan convertirse en un componente de la tecnología de manejo del suelo con bajos insumos.

G. Conclusiones

Con frecuencia, el fósforo es el insumo comprado más costoso en Oxisoles y Ultisoles de América tropical. Excepto en las tierras recientemente desmontadas en bosques húmedos, la fertilización fosforada es casi siempre esencial para sistemas de producción continua de cultivos o pastos. La alta capacidad de fijación de fósforo de los Oxisoles y Ultisoles francos y arcillosos ha hecho surgir temores por las grandes cantidades de fósforo que se requerirían para estas extensas áreas. Cinco de los principales componentes de la tecnología de manejo de suelos con bajos insumos, ya sea aplicados individualmente o preferiblemente juntos, pueden reducir considerablemente los requerimientos de fósforo y así aumentar la eficiencia de utilización de esta fuente básica.

VII. MANEJO DE LA BAJA FERTILIDAD NATURAL DEL SUELO

Además de las toxicidades de aluminio y manganeso, las deficiencias de calcio, magnesio y fósforo y la alta fijación de fósforo, muchos Oxisoles y Ultisoles de América tropical también son deficientes en otros nutrimentos esenciales, especialmente nitrógeno, potasio, azufre, cinc, cobre, boro y molibdeno (Sanchez, 1976; Spain, 1976; Lopes, 1980). Este síndrome de baja fertilidad en ocasiones ha provocado que estos Oxisoles menos fértiles se les considere como "desiertos de fertilidad."

(Sapin, 1975). En Ultisoles de la Amazonía del Perú que son un poco menos infértiles, Villachica (1978) y Sanchez (1970) registraron deficiencias de todos los nutrimentos esenciales para la planta excepto de hierro, manganeso y cloro en sistemas continuos de producción de cultivo, actualmente en su vigésimo cultivo consecutivo.

El Cuadro 2 muestra que el 93% de las regiones de Oxisoles y Ultisoles sufren por deficiencia de nitrógeno, el 77% presenta bajas reservas de potasio que son indicativas de una deficiencia de este elemento, el 71% presenta deficiencia de azufre, el 62% presenta deficiencia de cinc y el 30% presenta deficiencia de cobre. Con los datos disponibles no se puede determinar la extensión de las deficiencias de otros micronutrimentos. A pesar de que estas cifras son un indicativo del grado de limitación individual de cada elemento, siguen siendo estimativos brutos (Sánchez y Cochrane, 1980).

Las principales tecnologías de bajos insumos requeridas para manejar la baja fertilidad nativa del suelo se concentran en: (1) la utilización máxima de la fijación de nitrógeno por leguminosas en los suelos ácidos, (2) el aumento en la eficiencia de la fertilización con nitrógeno y potasio, (3) la identificación y corrección de deficiencias de azufre y micronutrimentos y (4) la promoción del reciclaje de nutrimentos.

A. Maxima Utilización de la Fijación Biológica del Nitrógeno

La tecnología de manejo de suelos con bajos insumos más conocida es la utilización de simbiosis de leguminosas-Rhizobium para satisfacer

La demanda de nitrógeno de la planta sin tener que comprar fertilizantes nitrogenados. La fijación biológica de nitrógeno está limitada a la simbiosis leguminosa-Rhizobium en estos suelos en términos de manejo práctico. La simbiosis entre bacterias fijadoras de nitrógeno tales como Spirillum lipoferum en las rizosferas de gramíneas tropicales, ha creado una amplia expectativa acerca de la posibilidad de la existencia de gramíneas fijadoras de nitrógeno, muchas de las cuales son tolerantes a la acidez (National Academy of Sciences, 1977a; Neyra y Dobereiner, 1977). Desafortunadamente, las evidencias que se tienen hasta el momento indican que la explotación práctica de dicha simbiosis en Oxisoles y Ultisoles es mínima por ahora (Hubbell, 1979). Este es un ejemplo de un componente de bajos insumos que hasta ahora no ha trabajado. Sin embargo, investigaciones básicas adicionales pueden revelar algunas implicaciones prácticas en el futuro y dicha investigación debe continuar.

Es afortunado que muchas de las especies de importancia económica que están adaptadas a las condiciones de suelos ácidos sean leguminosas. Entre los cultivos alimenticios anuales existen tres leguminosas importantes con tolerancia a la acidez: caupi, maní y gandul. Hay otras menos difundidas tales como frijol lima, frijol mungo y frijol alado. También existe una gran variedad de leguminosas forrajeras tolerantes a la acidez del género Stylosanthes, Desmodium, Zornia, Pueraria, Centrosema y muchas otras. También abundan leguminosas espontáneas en áreas desmontadas de bosques húmedos. Hecht (1979) registró 69 especies de leguminosas arbóreas, arbustivas y trepadoras en pasturas del Amazonas Oriental

del Brasil.

Para que estas leguminosas fijen suficiente nitrógeno, es necesario que los requerimientos nutricionales y el grado de tolerancia a la acidez del suelo del rizobio asociado se ajusten a los de la planta (Munns, 1978). De lo contrario, el crecimiento de las plantas será severamente afectado debido a la deficiencia de nitrógeno. Las cepas de Rhizobium difieren en su tolerancia a varios estreses de acidez del suelo, al igual que las plantas (Munns, 1978; Date y Halliday, 1979; Munns et al., 1979; Halliday, 1979; Keyser et al., 1979). En consecuencia, las prácticas de manejo del suelo requieren que se ajusten los requerimientos y tolerancias nutricionales tanto de las leguminosas como de los rizobios.

Hasta hace poco tiempo, se había presupuesto que la mayoría de las leguminosas forrajeras tropicales que crecen en los suelos ácidos desarrollan simbiosis efectiva con cepas de Rhizobium "tipo caupí" y, por lo tanto, la selección de cepas específicas para especies o cultivares de leguminosas individuales es la excepción en vez de la regla (Norris, 1972). Trabajos recientes adelantados por Halliday (1979) y sus colaboradores, muestran claramente que éste no es el caso. Un procedimiento de selección y ajuste de cinco etapas, incluyendo actividades de laboratorio, invernadero y de campo, ha demostrado un alto grado de especificidad de las cepas para obtener una simbiosis efectiva en la mayoría de los ecotipos de leguminosas forrajeras promisorias. Se dispone de recomendaciones recientes, incluyendo tecnología para la inoculación (CIAT, 1980).

Sin embargo, los experimentos de campo a largo plazo muestran que la respuesta a la inoculación con cepas seleccionadas de Rhizobium generalmente disminuye con el tiempo. La protección de la cepa inoculante mediante pelletización con cal o roca fosfórica con frecuencia permite una infección efectiva en un suelo ácido. Sin embargo, el punto crítico ocurre a los 2-3 meses, cuando se descompone la población primaria de nódulos. Después de este tiempo, los rizobios deben depender de sí mismos en el ambiente de suelos ácidos para reinfectar las raíces de las plantas (CIAT, 1979). La selección de cepas efectivas tolerantes a la acidez es por consiguiente altamente deseable. Date y Halliday (1979) desarrollaron una técnica sencilla de laboratorio para seleccionar por tolerancia a la acidez en etapas tempranas de la selección de cepas, utilizando un medio de agar amortiguado a pH 4.2. Las cepas de Rhizobium tolerantes a la acidez logran crecer en dicho medio, en tanto que las susceptibles mueren.

Utilizando este enfoque, se han logrado identificar y recomendar cepas específicas para sistemas de producción de pastos con bajos insumos en suelos ácidos, para varias accesiones de Stylosanthes capitata, Desmodium ovalifolium, Desmodium heterophyllum, Zornia spp., Pueraria phaseoloides, Aeschynomene brasiliana y A. histrix (CIAT, 1980).

En caupí (Keyser et al., 1970) y frijol mungo (Munns et al., 1979) también se han identificado diferencias entre cepas de rizobios por tolerancia a la acidez. En ambas especies, la planta hospedante tiende a ser más tolerante a la acidez que muchas de las cepas de Rhizobium. Aparentemente, soya es el caso opuesto, puesto que las cepas comerciales

disponibles de Rhizobium parecen ser más tolerantes que el hospedante (Munns, 1980). En términos de las necesidades nutricionales, los rizobios requieren mayores cantidades de cobalto y molibdeno para la fijación simbiótica de nitrógeno que la leguminosa hospedante para su crecimiento (Robson, 1978). Es necesario adelantar investigación adicional sobre los requerimientos relativos de otros nutrimentos y las interacciones entre la nutrición de la leguminosa y la nutrición de los rizobios.

Sin embargo, queda claro que los requerimientos nutricionales y la tolerancia a la acidez del suelo de las especies de leguminosas no se debe determinar en ausencia de la nodulación. Este es el caso casi invariable con los estudios en soluciones de cultivo. La selección de leguminosas por tolerancia a la acidez del suelo se debe hacer con suelo y con inoculación. Además del trabajo conjunto entre especialistas en fertilidad del suelo y fitomejoradores, también se debe contar con microbiólogos.

B. Aumento en la Eficiencia de la Fertilización con Nitrógeno y Potasio

1. Nitrógeno

Aparentemente, es factible que ningún fertilizante nitrogenado sea requerido para las pasturas a base de leguminosas tolerantes a la acidez para las regiones de suelos ácidos e infértiles de América tropical. Sin embargo, las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados son esenciales para los sistemas de producción de cereales o cultivos de raíces en estas regiones. La rotación o el cultivo intercalado de leguminosas de

grano con cereales puede disminuir las cantidades globales de nitrógeno requerido, no debido a una transferencia significativa del nitrógeno fijado a los cereales, sino debido a que las leguminosas ocupan espacio en los campos. La mayor parte del nitrógeno fijado por las leguminosas de grano es removida del campo durante la cosecha (Henzell y Vallis, 1977). En consecuencia, aumentar la eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados parece ser el principal camino para disminuir los insumos de fertilizantes nitrogenados en cultivos no leguminosos.

Son pocas las excepciones a lo anterior. Las respuestas al nitrógeno en estos suelos son casi universales, excepto durante el primer cultivo después del desmonte de bosques húmedos o en Oxisoles y Ultisoles que han sido fertilizados intensivamente con nitrógeno durante muchos años. Fox et al. (1974) no observaron respuestas al nitrógeno en maíz durante seis cultivos consecutivos de rendimientos relativamente altos en Ultisoles de Puerto Rico, debido a antecedentes a largo plazo de fertilización intensiva.

Se ha adelantado investigación extensiva sobre fertilización nitrogenada con maíz, arroz seco, sorgo, yuca y batata en Ultisoles y Oxisoles de América tropical. Una revisión hecha por Grove (1979) muestra que estos suelos suministran en forma típica 60-80 kg de N/ha a la mayoría de estos cultivos y que aplicaciones del orden de 80-120 kg de N/ha producen casi el 95% del rendimiento máximo, que en el caso del maíz es del orden de 5 ton/ha. Cuando se utilizan las dosis, fuentes y métodos de aplicación más eficientes (urea incorporada justo antes del período de absorción más rápida por la planta), la recuperación aparente del nitrógeno

fue de aparentemente un 56% (Gove, 1979). En arroz seco, la recuperación es del orden del 30% (Sánchez, 1972). En Oxisoles y Ultisoles de América tropical, la urea revestida con azufre no produjo ventajas significativas en comparación con la úrea común o el sulfato de amonio en cultivos de cereales o raíces.

En ambientes de alta precipitación con frecuencia se requieren dosis más altas de nitrógeno que las indicadas por Grove (1979) debido a la lixiviación. La división de la aplicación del nitrógeno en dos generalmente aumenta la recuperación de este elemento.

El problema con el resumen anterior es que la mayor parte de los datos fue colectada en experimentos en los que otras limitaciones de fertilidad se habían eliminado. No se sabe si la eficiencia de los fertilizantes nitrogenados sería diferente cuando se siembren cultivos de cereales o raíces tolerantes a la acidez en condiciones de bajos insumos de fósforo y cal. Pese a que se sabe que las variedades de maíz difieren en su habilidad para utilizar fertilizantes nitrogenados en forma eficiente (Gerloff, 1978), esto no se ha probado en situaciones de tecnología de bajos insumos. Características de la planta bien conocidas que aumentan las respuestas en rendimiento al nitrógeno, tales como porte bajo y alta capacidad de macollamiento en arroz seco en suelos de alta fertilidad, deben tener un efecto similar en suelos ácidos e infértiles.

Las pruebas de suelos son de poco valor para la fertilización nitrogenada debido a la movilidad de los nitratos en los Oxisoles y Ultisoles

bien drenados y a otros factores (Sánchez, 1976). En consecuencia, las recomendaciones de fertilización se basan en las experiencias de campo y en datos sobre absorción por la planta. Por consiguiente, la fertilización nitrogenada de cultivos de cereales y raíces es uno de los componentes más débiles de la estrategia de bajos insumos para estos suelos.

2. Potasio

La situación del potasio es similar a la del nitrógeno. Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los Oxisoles y Ultisoles presentan bajas reservas de potasio en sus minerales de arcilla y las deficiencias de este elemento aumentan con el tiempo (Ritchey, 1979). A diferencia del nitrógeno, la identificación de la deficiencia de potasio mediante la prueba de suelos se hace en forma directa. Para la mayoría de los cultivos, los niveles críticos establecidos se encuentran dentro de un rango de 0.15-0.20 meq de K/100 g. Desafortunadamente, no hay atajos obvios para el manejo del potasio en bajos insumos, no hay diferencias inter o intra específicas mayores en términos de "la tolerancia a bajos niveles de potasio disponibles en el suelo". Los requerimientos de fertilizantes potásicos pueden llegar a niveles de 100-150 kg de K_2O /ha/cultivo. Aunque no tan costos por unidad como el nitrógeno o el fósforo, dichos gastos representarían un costo significativo para los agricultores. Los principales medios para aumentar la eficiencia de la fertilización con potasio incluyen las aplicaciones divididas y evitar remover los residuos de cosecha, especialmente el forraje, con

el fin de obtener algún grado de reciclaje.

La eficiencia de la utilización del potasio se está volviendo un punto de creciente interés en regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical, a medida que el progreso en la superación de limitantes por la acidez, el fósforo y el nitrógeno, aumenta el rendimiento potencial y, por consiguiente, los requerimientos del potasio. Se requiere urgentemente un esfuerzo investigativo prioritario sobre la eficiencia del potasio.

C. Identificación y Corrección de Deficiencias de Azufre y Micronutrientes

Los Oxisoles y Ultisoles son frecuentemente deficientes en azufre y varios micronutrientes, especialmente cinc, cobre, boro y molibdeno (Kamprath, 1973; Cox, 1973; Blair, 1979; Lopes, 1980). Desafortunadamente, se conoce muy poco acerca de la ocurrencia geográfica de estas deficiencias, sus niveles críticos en el suelo y los requerimientos de las especies y variedades tolerantes a la acidez.

Hutton (1979) le atribuyó a la mayor parte de la falta de persistencia de la leguminosa en pasturas mixtas de América Latina a deficiencias nutricionales sin corregir. Muchos ganaderos de América tropical consideran que la aplicación de superfosfato triple es suficiente fertilización para pasturas de gramíneas/leguminosas. Esta fuente de fertilizante solamente proporciona fósforo y algo de calcio. En Australia tropical, el superfosfato simple molibdenizado se utiliza ampliamente como el único fertilizante en Alfisoles que son muy deficientes en nitrógeno, fósforo,

azufre y molibdeno. Esta fuente corrige las deficiencias de fósforo, azufre y molibdeno, permitiendo a la leguminosa proporcionar el nitrógeno a la mezcla. Dadas las diferencias fundamentales en lo que respecta a la acidez entre los suelos de Australia tropical en donde se cultivan pasturas mejoradas (principalmente Alfisoles) y la región de Oxisoles-Ultisoles de América tropical, no es posible extrapolar las prácticas de fertilización australianas (Sánchez e Isbell, 1979). La situación no es mucho mejor para la producción de cultivos puesto que la mayoría de los fertilizantes disponibles son formulaciones directas de NPK. Mediante el uso de fuentes con mayores concentraciones de estos elementos tales como urea, superfosfato triple y KCl, el contenido de azufre de dichas mezclas ha disminuído y la deficiencia de este elemento se ha vuelto más difundida.

Los estudios sobre el estado de fertilidad de regiones de Oxisoles-Ultisoles, tales como los que hicieron Lopes y Cox (1977a) en el Cerrado de Brasil, más experimentos de campo sobre el contenido de nutrimentos en el suelo tales como los realizados en Carimagua, Colombia (CIAT, 1977, 1978, 1979, 1980; Spain, 1979) y en Yurimaguas, Peru (Villachica, 1978), contribuyen significativamente a la identificación de los nutrimentos que son deficientes y a las mejores prácticas que sería recomendable aplicar para corregir estas deficiencias. También ayudan en la identificación de posibles desequilibrios nutricionales que puedan ser inducidos por la fertilización. Por lo tanto, es necesaria la iden-

tificación específica en las localidades. Estos esfuerzos se deben relacionar con los requerimientos nutricionales de las principales especies y variedades. Es relativamente poco lo que se conoce acerca de las especies tolerantes a la acidez mencionadas en el presente artículo. El Cuadro 36 muestra tentativamente los niveles críticos externos e internos de azufre para las principales especies de gramíneas y leguminosas en condiciones de Oxisoles.

Cuando se identifica uno de estos factores limitantes, los resultados pueden ser extremadamente positivos. Wang et al. (1976) identificaron una deficiencia de azufre en áreas productoras de arroz en la Amazonía baja de Brasil. La producción de arroz mejoró considerablemente al cambiar de urea a la aplicación de sulfato de amonio, suministrando así azufre. En otras partes se han registrado experiencias similares con la identificación de deficiencias de micronutrientes y su corrección (Cox, 1973; Lopes, 1980).

El conocimiento insuficiente sobre las deficiencias nutricionales es probablemente el componente más débil de la tecnología de bajos insumos. Esta brecha se puede corregir mediante la determinación sistemática de los niveles críticos de nutrientes tanto en el suelo como en las plantas. Afortunadamente, los costos de aplicación son bajos y la fertilización con zinc y cobre produce efectos residuales prolongados.

D. Promoción del Reciclaje de Nutrientes

Las prácticas de manejo de suelos en suelos de baja fertilidad deben estimular el reciclaje de nutrientes en cuanto esto sea posible.

El reciclaje de nutrimentos es la razón principal por la cual los Oxisoles y Ultisoles ácidos e infértiles pueden sostener una vegetación exuberante en los bosques húmedos tropicales de ambientes údicos. La magnitud de este reciclaje natural es de gran interés. Dos estudios detallados realizados en un Oxisol en Manaus, Brasil (Fittkau y Klinge, 1973) y en un Oxisol del Carare-Opón, Colombia (Salas, 1978) muestran que las adiciones anuales de nutrimentos por medio de la capa de humus oscilan de la siguiente manera (en kg/ha): 106-141 de N, 4-8 de P_2O_5 , 15-20 de K_2O , 18-90 de Ca y 13-20 de Mg. Las adiciones de nutrimentos por lavados de la lluvia, descomposición de maderas y descomposición de raíces pueden doblar los estimativos anteriormente indicados.

En sistemas de producción de cultivos, una porción significativa de los nutrimentos se remueve del suelo al momento de la cosecha. Las aplicaciones de fertilizantes para "mantenimiento" con el objetivo de reemplazar lo que las cosechas removieron del suelo, rara vez son suficientes para obtener rendimientos sostenidos de un cultivo (NCSU, 1974, 1975). Por consiguiente, el reciclaje de nutrimentos ofrece posibilidades limitadas en sistemas de producción de cultivos. Una posible aplicación puede ser dejar los residuos de cosechas en la forma de coberturas, particularmente en el caso de el forraje de maíz y la paja de arroz, con el fin de reciclar el potasio otra vez al suelo. Existe poca información sobre el efecto de estas u otras prácticas de coberturas en el reciclaje de nutrimentos.

En sistemas de producción de pasturas existe un mecanismo natural de reciclaje mediante el cual aproximadamente un 80% del nitrógeno, fósforo y potasio consumido por el ganado vuelve al suelo por las excreciones (Mott, 1974). Este porcentaje es un estimativo bruto y depende considerablemente de la tasa de carga, el manejo del pastoreo y otros factores. La limitada información disponible para regiones de Oxisoles-Ultisoles muestra que este es un mecanismo importante. La Figura 34 muestra los cambios en los 20 cm superiores de un suelo Orthoxic Palehumult de Quilichao, Colombia, causados por la deposición de excrementos en una pastura de Brachiaria decumbens bajo pastoreo rotacional cada 15 días. Esta figura muestra que el contenido de nitrógeno inorgánico en la capa superior del suelo se dobló en 15 días dentro de un radio de 1 m de las excreciones y disminuyó de allí en adelante. El fósforo, potasio, calcio y azufre también mostraron un aumento similar, seguido por una disminución más gradual con el tiempo que el nitrógeno. Los efectos de la orina (no mostrados) indican un aumento más marcado en potasio y azufre en comparación con las heces, pero un aumento más pequeño en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y calcio (CIAT, 1981). Los efectos globales de estas adiciones se reflejaron favorablemente en aumentos de todos los cinco elementos en los tejidos de las plantas en los primeros 30 días después de la deposición de los excrementos.

En la Figura 35 se presentan evidencias indirectas del reciclaje de nutrimentos en pasturas mal manejadas en Oxisoles del Amazonas Oriental

del Brasil, en donde el bosque se cortó mediante el método del corte y la quema y posteriormente se sembró Panicum maximum. Serrao et al. (1979) tomaron muestras de suelos en pasturas de Panicum maximum sin fertilizar y de edades conocidas en dos localidades. El pH del suelo aumento desde aproximadamente 4.5 hasta 6-7 después de la quema y permaneció constante durante 13 años. La toxicidad por aluminio se eliminó totalmente puesto que los niveles de calcio y magnesio se mantuvieron en niveles relativamente altos. Los niveles de materia orgánica y nitrógeno también permanecieron altos durante el período de 13 años. Los niveles de potasio permanecieron cerca del nivel crítico, en tanto que el fósforo disponible disminuyó por debajo del nivel crítico (5 ppm de P mediante Mehlich 2) en pocos años. Estos resultados provienen de muestras tomadas al mismo tiempo de diferentes campos de edad conocida después de haber sido desmontados; por consiguiente, incluyen la variabilidad por el tiempo y el espacio. Sin embargo, parece claro que muchas de las propiedades químicas de estos Oxisoles son definitivamente mejoradas por el desmonte y el pastoreo.

Esta dinámica del suelo contrasta agudamente con la disminución rápida de la fertilidad que se ha observado después del desmonte de bosques húmedos y la producción de cultivos anuales en áreas údicas de Perú (mostradas en la Fig. 10). Las razones de estas diferencias no se comprenden claramente y merecen un estudio más profundo. Algunos factores que favorecen una disminución menos marcada en la fertilidad en la Amazonía oriental pueden ser un régimen de humedad del suelo ústico que per-

mite una quema más completa y mayor deposición de cenizas y posiblemente un movimiento ascendente de cationes y aniones durante la estación seca. Además, la quema periódica practicada en estas áreas y algún grado de reciclaje de nutrimentos por el animal en pastoreo pueden contribuir a los efectos mostrados en la Figura 35. Cualesquiera que sean las razones, el mejoramiento en las propiedades químicas de los Oxisoles ácidos infértiles es considerable y aparece como promisorio para un mejor manejo de las pasturas de gramíneas-leguminosas en la región del Amazona.

Se espera que los sistemas agrícolas que incluyan árboles produzcan mejor reciclaje de nutrimentos. Se espera que árboles de importancia económica tales como el cacao y la plama de aceite tengan un mecanismo de reciclaje de nutrimentos similar al de los bosques húmedos (Alvim, 1981). Sin embargo, es muy limitada la información que se dispone hasta el momento para sostener esta hipótesis. Silva (1978) observó evidencias de un reciclaje incipiente de nutrimentos en varios cultivos permanentes en un Oxic Paleudult de Barroilandia, Bahia, Brasil, en términos de un aumento de bases intercambiables en los 5 cm superiores del suelo a los 34 meses después de la quema. El aumento es más marcado en la plantación joven de palma de aceite con una cobertura del suelo de Pueraria Phaseoloides, seguida por el pasto, y en menor grado en un cultivo intercalado de yuca-banano que precede a la siembra de cacao. Se han hecho observaciones similares con algunas especies forestales sembradas con una cobertura de suelo de Pueraria phaseoloides en un Oxisol de Manaus, Brasil (P. T. Alvim, comunicación personal). Se requieren más datos que

cubran un espectro de tiempo más prologado con el fin de determinar totalmente la importancia del reciclaje de nutrimentos en sistemas de cultivos en regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical.

E. Conclusiones

La baja fertilidad natural de Oxisoles-Ultisoles no se puede eliminar sin insumos significativos de fertilizantes. Hay varios medios disponibles para disminuir los requerimientos globales de fertilizantes. Sin embargo, la necesidad de la fertilización nitrogenada puede ser básicamente eliminada en sistemas de pasturas a base de leguminosas mediante el uso de cepas de Rhizobium tolerantes a la acidez en asociación con especies de leguminosas tolerantes a la acidez. Esto también es posible con las leguminosas de grano tolerantes a la acidez, pero definitivamente no lo es para especies cereales y cultivos de raíces. El efecto residual del nitrógeno fijado por una leguminosa para un cultivo no leguminoso ya sea intercalado o en rotación parece ser muy bajo puesto que la mayor parte del nitrógeno es removido a la cosecha. El aumento de la eficiencia de la fertilización nitrogenada para especies no leguminosas se puede lograr mediante el mejoramiento de la época y el método de aplicación de los fertilizantes. Es poco lo que se conoce acerca de la eficiencia de la fertilización nitrogenada de cultivos de cereales tolerantes a la acidez en sistemas de bajos insumos.

Las deficiencias de potasio y azufre son difundidas y, en el caso de la deficiencia de azufre, ésta se ha difundido aún más con el uso de

fertilizantes con mayor concentración de los elementos mayores. La identificación de deficiencia de estos nutrimentos y de micronutrimentos es una brecha considerable en América tropical. Esta se puede superar mediante servicios efectivos de evaluación de la fertilidad del suelo, incluyendo el establecimiento de niveles críticos y recomendaciones de fertilizantes.

El reciclaje de nutrimentos se debe promover, pero en sistemas de producción de cultivos las posibilidades parecen ser muy limitadas a la utilización de los residuos de cosecha. Es necesario cuantificar la magnitud del reciclaje de nutrimentos en sistemas de pasturas y en sistemas silviculturales.

VIII. DISCUSION

Las secciones anteriores han descrito los diversos componentes de una tecnología de manejo de suelos con bajos insumos que se puede utilizar en los suelos ácidos e infértiles del trópico en América. Obviamente, cada componente no se puede aplicar a todas las situaciones o sistemas agrícolas en esta extensa área objetivo; algunos componentes son mutuamente excluyentes. Igualmente, hay varios componentes que se encuentran razonablemente bien desarrollados y listos para la validación local, en tanto que otros son apenas observaciones preliminares. Sin embargo, globalmente representan una filosofía de manejo de suelos para tierras marginales del trópico. La misma filosofía se puede aplicar a otros aspectos de la agricultura, particularmente a la protección de plantas. Esta sección de la revisión examina algunas de las implicaciones de la

utilización de dicha tecnología.

A. Enfoques de Bajos Insumos Versus Altos Insumos

En el término " tecnología de bajos insumos " hay bastante ambigüedad. Qué tan bajo es bajo y en comparación con qué? Los términos "cero insumos" e "insumos mínimos" también se han utilizado. El primero no es apropiado puesto que en la mayoría de los sistemas cero insumos resulta en cero producción. Bajos insumos en contraposición con insumos intermedios o altos merece alguna cuantificación. *En esta revisión, nos gustaría considerar la tecnología de bajos insumos para los suelos ácidos del trópico como la necesaria para obtener aproximadamente un 80% de los rendimientos máximos del germoplasma tolerante a la acidez mediante el uso más eficiente de los suelos, fertilizantes y cal.* Esta revisión muestra que es biológicamente factible alcanzar estos niveles de rendimiento con la tecnología y el germoplasma disponible a un nivel de insumos considerablemente menor que mediante el uso de la tecnología y el germoplasma tradicional.

Qué es lo malo de la tecnología tradicional de altos insumos que ha sido la base de gran parte de nuestra producción actual mundial de alimentos? Desde el punto de vista agronómico, es poco lo malo que tiene. Si fuéramos agricultores en una región de Oxisoles y el gobierno nos diera a escoger entre superar los principales factores limitantes edáficos mediante la financiación de aplicaciones masivas de fósforo, suficiente cal y sistemas suplementarios de riego y la alternativa de poner en

práctica los componentes descritos en esta revisión, inmediatamente tomaríamos la primera alternativa. Como agricultores veríamos el valor de nuestra tierra aumentando al transformarse de tierras marginales a tierras excelentes por la aplicación de insumos. En efecto, el autor principal vió a su padre hacer exactamente esto en una finca con Oxisoles de 50 ha, en donde obtenía 3 cultivos/año con riego y se beneficiaba suficientemente de ello. Es difícil encontrar un mejor suelo que manejar que un Oxisol una vez que se hayan eliminado sus limitaciones químicas.

Sin embargo, dichas oportunidades son la excepción en vez de la regla en las regiones de suelos ácidos e infértiles de América tropical. La magnitud del capital para invertir necesario para aplicar la tecnología de altos insumos a estos suelos, normalmente va más allá de los recursos de la mayoría de los gobiernos y de las organizaciones privadas. Las prioridades políticas también dictaminan que la intensificación agrícola mediante un alto nivel de insumos se localice en donde estén las grandes concentraciones de agricultores, generalmente en suelos con un alto nivel de bases.

Los costos crecientes de los insumos relacionados con el petróleo y el énfasis mundial de conservar los recursos naturales de la tierra anteponen restricciones adicionales al enfoque de "máximos insumos". Las metas de desarrollo de muchos países tropicales requieren que tanto los productores como los consumidores de recursos limitados sean los principales beneficiarios de la tecnología agrícola mejorada. Nickel

(1979) indicó que si los consumidores de bajos ingresos han de beneficiarse, los aumentos en la producción de alimentos se deben lograr a costos unitarios más bajos. Estos bajos costos unitarios se pueden alcanzar mediante tecnología que tenga una base biológica la cual con frecuencia es de aplicación neutra. Para asegurar que los productores de bajos recursos tengan acceso a esta tecnología, no debe depender de grandes cantidades de insumos comprados. *En consecuencia, la principal justificación de la tecnología de manejo de suelos con bajos insumos en regiones de Oxisoles-Ultisoles de América tropical, es de naturaleza socioeconómica y no agroeconómica.*

En el pasado, los agricultores se ajustaron a su falta de poder adquisitivo aplicando cantidades bajas de insumos a un sistema agrícola diseñado para operar mejor a niveles altos de insumos. Ejemplos de esto abundan en América Latina, en donde las deficiencias de nutrimentos son evidentes en muchos campos. Muchos agricultores saben que sus cultivos podrían dar mayores rendimientos si se le aplicaran más fertilizantes a las variedades con alto potencial de rendimiento, pero no pueden comprar más o no se atreven a hacerlo debido al alto riesgo involucrado. Otro ejemplo es el intento en gran escala de la producción de ganado de carne en Oxisoles y Ultisoles del Amazona de Brasil mediante la siembra de Panicum maximum sin fertilización fosforada. Este es claramente el caso de la ignorancia de factores limitantes edáficos muy obvios. Como lo ha mencionado repetidamente Paulo Alvim en reuniones acerca del Amazonas, "la agricultura es diferente de la minería". Los agricultores

deben adicionar fertilizantes con el fin de sostener la producción, inclusive en los mejores suelos de las regiones templadas.

La tecnología de manejo de suelos con bajos insumos para estos suelos ácidos es diferente de la adopción parcial de la tecnología de altos insumos. *La tecnología de bajos insumos no es menos o lo mismo sino una manera diferente de manejar el suelo.* El adelanto fundamental ha sido la identificación de especies y variedades importantes que pueden tolerar grados significativos de factores limitantes impuestos por la acidez del suelo. Entonces, es cuestión de determinar la cantidad de fertilizante y de cal que estas especies tolerantes requieren para producir un 80% de su rendimiento máximo en forma sostenida.

Finalmente, una mejor comprensión de los atributos favorables de los suelos ácidos e infértiles convierten a ciertos factores edáficos limitantes en ventajas para el manejo. A continuación se presentan cuatro ejemplos:

1. Manteniendo el suelo en su estado ácido, se pueden utilizar directamente rocas fosfóricas de baja reactividad, abundantes en América tropical, en una fracción del costo de los superfosfatos. En efecto, la química de la acidez del suelo reemplaza a la fábrica de superfosfato a un ahorro considerable de energía, siempre y cuando se cultiven plantas tolerantes al aluminio.

2. Una infertilidad del suelo extremadamente ácida puede evitar la infestación con malezas, en tanto que las aplicaciones localizadas de

fertilizantes promueven el crecimiento vigoroso del cultivo o de la pastura deseada.

3. En muchos de estos suelos, la capacidad de intercambio catiónico poco efectiva se puede considerar como una ventaja. Los suelos arcillosos con una baja capacidad de intercambio catiónico efectiva generalmente presentan una mejor estructura y son menos desgastables que los suelos con arcillas de alta actividad y con un contenido de arcilla similar.

4. Una baja capacidad de intercambio catiónico efectiva permite el aumento gradual en el nivel de bases del subsuelo mediante el movimiento descendente del calcio y el magnesio. En lugar de la deterioración, la fertilidad de estos suelos realmente mejora, permitiendo un desarrollo radical más profundo lo cual, a su vez, permite la utilización de la humedad hasta ahora no disponible en el suelo. Esta es una alternativa atractiva en comparación con los sistemas más costosos de riego suplementario.

B. Productividad de los Sistemas de Bajos Insumos

Los sistemas de manejo de suelos de altos insumos agrónomicamente viables producen casi invariablemente rendimientos más altos que los sistemas de bajos insumos definidos aquí. Hay varias razones que responden a esta observación. Cuando se eliminan los factores limitantes edáficos mediante fertilización, encañamiento y riego, es posible utilizar especies y variedades que presentan un mayor rendimiento potencial absoluto que las variedades tolerantes a la acidez disponibles hasta el mo-

momento. La razón de esta diferencia es muy simple. Los fitomejoradores se han concentrado tradicionalmente en el aumento del rendimiento potencial en ausencia de factores limitantes edáficos. El mejoramiento genético para combinar los distintos atributos del alto rendimiento con la tolerancia a la acidez es aún incipiente. Sin embargo, no hay variedades de arroz tolerantes al aluminio con el potencial de rendimiento de IR8. Andropogon gayanus no tiene el potencial de producción o la calidad nutricional que Pennisetum purpureum fertilizado en forma intensiva, pero su apetecibilidad por el ganado es alta. Stylosanthes guianensis no supera a la alfalfa en términos de su calidad en condiciones óptimas.

Esta limitación es probablemente cuestión de tiempo puesto que algunas tolerancias a los estreses de la acidez del suelo están controladas por uno o dos genes, que con frecuencia son dominantes (Rhue, 1979). En consecuencia, la combinación de la tolerancia a la acidez con el alto rendimiento potencial parece factible desde el punto de vista del fitomejoramiento. Sin embargo, el mejoramiento genético por la tolerancia a la acidez del suelo apenas está comenzando. La mayor parte del trabajo en este campo está basada en la selección del germoplasma preexistente y no de poblaciones segregantes producidas por un programa de mejoramiento genético por tolerancia a la acidez. Es necesario intensificar el trabajo conjunto entre los fitomejoradores y los científicos especialistas en suelos. Su beneficio podría ser tan importante como los esfuerzos exitosos de los fitomejoradores con los patólogos y entomólogos en el mejoramiento de la resistencia a enfermedades o insectos.

En efecto, el beneficio puede ser aún mayor puesto que las variedades tolerantes a la acidez pueden tener un espectro de tiempo útil más prolongado que las variedades tolerantes a enfermedades o insectos. El ión aluminio no muta hacia una raza más virulenta como sí ocurre con muchos hongos o cepas de bacterias.

C. Minería del Suelo o Mejoramiento del Suelo?

Se ha manifestado que las especies de plantas tolerantes a las limitaciones de los suelos ácidos, particularmente las tolerantes a niveles más bajos de fósforo aprovechable, pueden agotar completamente la baja reserva de nutrimentos que tiene estos suelos y dejarlos totalmente inútiles. La tecnología de bajos insumos a veces se considera como el último esfuerzo para extraer el último poco de fertilidad de estos suelos.

Este argumento se debe analizar en términos de las reservas totales del suelo, las cantidades de fertilizantes que se deben agregar y la extracción total de nutrimentos.

Mediante el crecimiento continuo de plantas, la disponibilidad de ciertos nutrimentos en el suelo disminuye eventualmente por debajo del nivel crítico. En Oxisoles y Ultisoles, ésto ocurre relativamente rápido con el nitrógeno y el potasio, elementos que son muy movibles en su forma aprovechable. El agotamiento del nitrógeno es muy poco factible debido a la gran reserva en la fracción orgánica y su reposición mediante descomposición radical, fijación de nitrógeno y otros factores en el sistema agrícola. Los contenidos de materia orgánica no son generalmente

diferentes de los principales suelos de la región templada (Sánchez, 1976). La situación con el azufre es similar. La tasa de agotamiento del potasio depende de la reserva del suelo en forma no intercambiable, principalmente en minerales de las arcillas. Las reservas de potasio de estos suelos generalmente proporcionan menos que el nivel crítico generalmente aceptado de 0.15 meq/100 g. Por consiguiente, se establece un equilibrio entre el potasio aprovechable (intercambiable) y el no intercambiable. Este nivel no logrará sostener un crecimiento rápido de las plantas pero no disminuirá las reservas de potasio en el suelo a cero. Como los residuos de cosecha o las pasturas maduras presentan generalmente altos niveles de este elemento, generalmente ocurre algún grado de reciclaje.

El potencial de "minería" del calcio, magnesio, cinc, hierro, cobre, boro, manganeso y molibdeno parecen menos factible puesto que las cantidades removidas por las cosechas de las plantas son muy pequeñas en comparación con las reservas totales de los suelos en Oxisoles y Ultisoles. Igualmente, las formas aprovechables de estos elementos son menos móviles en los suelos, y, por consiguiente, están menos sujetas a pérdidas.

Esto nos deja al fósforo, el elemento alrededor del cual se presentan la mayoría de los argumentos sobre la "minería del suelo". El contenido total del fósforo en la capa superficial de Oxisoles y Ultisoles oscila entre 100 y 200 ppm de P, en comparación con el nivel de aproximadamente 3000 ppm de P en los suelos de arcillas de alta actividad con un alto nivel de bases de la región occidental central de Estados Unidos

y regiones templadas similares (Sánchez, 1976). Sin embargo, algunos Oxisoles presentan contenidos muy altos de fósforo, tales como el Eustrustox del Cerrado del Brasil (Moura et al., 1972), pero la poca información disponible indica que la mayoría de los Oxisoles y Ultisoles presentan por lo general bajos niveles de fósforo.

El Cuadro 37 muestra el contenido total de fósforo de un perfil de un Oxisol de Carimagua, Colombia, que representa al rango menos fértil de las regiones de Oxisoles-Ultisoles de América Tropical. Las reservas totales de fósforo de los 150 cm superiores oscilan alrededor de un promedio de 106 ppm de P, equivalente a 4830 kg de P_2O_5 /ha de fósforo total. Sin embargo, las raíces de plantas tolerantes a la acidez pueden penetrar a profundidades mayores de 150 cm.

El Cuadro 38 muestra la absorción total de fósforo por dos gramíneas tolerantes a la acidez en condiciones de pastoreo en Carimagua. La absorción total de fósforo por el forraje disponible para los animales osciló entre 3-12 kg de P/ha/año (7.5-28 kg de P_2O_5 /ha).

Asumiendo que todo el fósforo fue removido de la pastura, ignorando así el reciclaje, las cantidades adicionadas de fertilizantes (50 kg de P_2O_5 /ha/año) más que compensaron la remoción. Por consiguiente, no hay minería del suelo sino realmente una restauración lenta del fósforo. El Cuadro 28 confirma que hay una restauración total del fósforo en estos suelos de aproximadamente 16 ppm de P/año en la capa superficial del suelo mediante la aplicación de dosis de 50-100 kg de P_2O_5 /ha/año.

En el caso de la producción de cultivos, las tasas de remoción de fósforo son mayores. Wade (1978) indicó que cuatro cosechas consecutivas de caupí, maíz, maní y arroz, dejando los residuos en su lugar, produjo una remoción total hasta de 68 kg de P_2O_5 /ha/año en Yurimaguas. La cantidad total adicionada fue de 50 kg de P_2O_5 /ha, lo cual indica un equilibrio muy cercano. Una dosis anual de aplicación de 100 kg de P_2O_5 /ha/año probablemente produciría un aumento gradual en el fósforo disponible. Los datos a largo plazo sobre dinámica del suelo en Yurimaguas muestra una mayor restauración del fósforo aprovechable, calcio, cinc y cobre con el cultivo continuo en esta región (Sánchez, resultados sin publicar).

Es conocido el hecho de que las plantas remueven menos fósforo que el que se aplica como fertilizante. Como las tecnologías de bajos insumos descritas en esta revisión incluyen la fertilización, el argumento de la minería del suelo parece tener muy poca validez.

D. Necesidades de Investigación

Esta revisión ha demostrado la factibilidad del enfoque de bajos insumos y presentó ejemplos de los componentes de la tecnología de manejo de suelos con bajos insumos. Las instituciones de investigación responsables del desarrollo de sistemas agrícolas de bajos insumos para suelos representativos posiblemente querrán integrar los componentes que son pertinentes a su situación en sus sistemas agrícolas. Los autores de esta revisión no conocen sistemas agrícolas mejorados de bajos insumos que tengan todos los componentes necesarios suficiente-

mente bien desarrollados. Por consiguiente, la primera prioridad de investigación en la mayoría de las situaciones es desarrollar totalmente los componentes de la tecnología de bajos insumos para un sistema agrícola particular. Los puntos presentados en una lista en la Sección I.C de esta revisión, podría servir como lista de verificación sujeta a modificación local.

Esta revisión también ha identificado varias brechas importantes en el conocimiento. Una lista parcial de estas brechas en el conocimiento es la siguiente:

1. *Caracterización de las principales variedades de ecotipos promisorios de las principales especies de cultivos anuales, pastos y cultivos permanentes por su tolerancia a las distintas limitaciones impuestas por la acidez del suelo en términos de los niveles críticos cuantitativos.* Dadas las interacciones entre los niveles de aluminio, calcio y fósforo disponible en el suelo, se deben especificar los factores que se mantienen constantes. Estos factores constantes deben reflejar los niveles encontrados en el sistema edáfico-agrícola particular, no necesariamente eliminándolos como limitantes. En el caso de especies leguminosas, se deben utilizar plantas inoculadas con una cepa de Rhizobium apropiada.

2. *La caracterización de los niveles críticos por pruebas de suelos para las deficiencias o toxicidades de nutrimentos en los principales tipos de suelos para especies y variedades utilizadas en sistemas de bajos insumos.* Las principales brechas se encuentran en los nutrimentos

mente bien desarrollados. Por consiguiente, la primera prioridad de investigación en la mayoría de las situaciones es desarrollar totalmente los componentes de la tecnología de bajos insumos para un sistema agrícola particular. Los puntos presentados en una lista en la Sección I.C de esta revisión, podría servir como lista de verificación sujeta a modificación local.

Esta revisión también ha identificado varias brechas importantes en el conocimiento. Una lista parcial de estas brechas en el conocimiento es la siguiente:

1. *Caracterización de las principales variedades de ecotipos promisorios de las principales especies de cultivos anuales, pastos y cultivos permanentes por su tolerancia a las distintas limitaciones impuestas por la acidez del suelo en términos de los niveles críticos cuantitativos.* Dadas las interacciones entre los niveles de aluminio, calcio y fósforo disponible en el suelo, se deben especificar los factores que se mantienen constantes. Estos factores constantes deben reflejar los niveles encontrados en el sistema edáfico-agrícola particular, no necesariamente eliminándolos como limitantes. En el caso de especies leguminosas, se deben utilizar plantas inoculadas con una cepa de Rhizobium apropiada.

2. *La caracterización de los niveles críticos por pruebas de suelos para las deficiencias o toxicidades de nutrimentos en los principales tipos de suelos para especies y variedades utilizadas en sistemas de bajos insumos. Las principales brechas se encuentran en los nutrimentos*

secundarios y en los micronutrientes.

3. *El desarrollo de medios para interpretar los sistemas de evaluación de tierras en términos de los requerimientos de tecnología de bajos insumos.*

4. *El estudio de los cambios en las propiedades del suelo tanto químicas como físicas, con el tiempo, en las principales situaciones de los sistemas edáficos-agrícolas. Estos estudios permitirían predecir los cambios en la dinámica de los nutrientes o en la deterioración física del suelo y corregir estos cambios antes de que ocurran. La información sobre dinámica del suelo es escasa y generalmente refleja un período de tiempo muy corto. También se requieren estudios a largo plazo para observar los cambios en las propiedades del suelo a fin de establecer una mejor comprensión de lo que ocurre en suelos manejados mediante sistemas de bajos insumos. Los interrogantes acerca del grado de reciclaje de nutrientes, la cantidad de nitrógeno residual en sistemas que incluyen leguminosas y la eficiencia del uso de fertilizantes podrían ser respondidos mediante estos estudios a largo plazo de las propiedades del suelo y sus relaciones con la producción de plantas.*

5. *Los sistemas de agroilvicultura se deben cuantificar. La mayor parte de los datos cuantitativos de este artículo se relacionan con cultivos alimenticios anuales y pasturas. Es necesario establecer una base de datos sobre sistemas agrícolas que incluyen especies forestales solas o en combinación con cultivos anuales y pasturas.*

6. El aumento de la fertilidad del subsuelo requiere trabajo adicional considerable. Se requiere una mayor comprensión básica sobre la química del movimiento del calcio y del magnesio, como también de otros factores que alivian la toxicidad de aluminio en el subsuelo por medio de la lixiviación.

7. La tolerancia a los bajos niveles de fósforo aprovechable requiere una mayor comprensión. Las teorías y los estudios de invernadero sobre la capacidad diferencial de las plantas para acidificar su rizosfera (Israel y Jackson, 1978; Van Raij y Van Diest, 1979) se deben probar y validar en las condiciones de Oxisoles-Ultisoles.

8. Los distintos componentes de la tecnología de manejo del fósforo en bajos insumos se debe reunir en un solo paquete. Es posible combinar para sistemas específicos de suelos-agricultura las mejores fuentes, dosis, métodos de aplicación y la interacción con variedades tolerantes a bajos niveles de fósforo aprovechable, inoculación con Rhizobium e inoculación potencial de cepas mejoradas de micorrizas. Es necesario desarrollar fuentes de fertilización de fósforo mejoradas o menos costosas.

9. Adaptar las especies o variedades de leguminosas tolerantes a la acidez del suelo con cepas de Rhizobium, con el fin de hacer que ambas sean compatibles al mismo grado de los estreses impuestos por la acidez del suelo y para favorecer la persistencia de los rizobios en el suelo.

10. El desarrollo de nuevos métodos para mejorar la eficiencia de la fertilización nitrogenada en cultivos no leguminosos y de la fertilización con potasio en todos los cultivos. La baja recuperación de los fertilizantes nitrogenados y potásicos es un obstáculo considerable que no permite disminuir los costos unitarios.

IX. RESUMEN

La tecnología de bajos insumos para los suelos ácidos de los trópicos se puede definir como un grupo de prácticas que puede producir aproximadamente un 80% de los rendimientos máximos de las especies y variedades tolerantes a la acidez, con el uso más eficiente de los suelos y los insumos químicos. El término "bajos" se utiliza con relación a la tecnología de "altos" insumos en la cual la aplicación de fertilizantes y enmiendas elimina en gran parte las limitaciones químicas del suelo. La identificación de especies y ecotipos de plantas tolerantes a los principales estreses de los suelos ácidos permite el desarrollo de sistemas de manejo de suelos con bajos insumos para las regiones de Oxisoles-Ultisoles, donde las limitaciones socioeconómicas obstaculizan la amplia aplicación de grandes cantidades de cal y fertilizantes. El enfoque básico es utilizar plantas adaptadas a los factores limitantes de los suelos ácidos, maximizar el uso de los fertilizantes y de la cal que se requieren para producir aproximadamente un 80% de sus rendimientos máximos y aprovechar los atributos favorables de los Oxisoles y Ultisoles ácidos e infértiles. Ya se han identificado razonablemente bien varios componentes tecnológicos y se podrían utilizar como bloques de construcción para sistemas específicos de manejo :

1. La selección de tierras dominadas por Oxisoles o Ultisoles bien drenados sin pendientes marcadas y la identificación de los prin-

cipales factores edáficos limitantes que prevalecen.

2. La selección de especies y variedades de cultivos anuales, pastos o cultivos arbóreos que puedan tolerar un grado razonable de toxicidad por aluminio, bajos niveles de fósforo disponible y/o toxicidad por manganeso, como también que se adapten a los estreses causados por el clima, las plagas y las enfermedades.

3. Los métodos de desmonte en bosques húmedos deben incluir la práctica de la quema a fin de aprovechar el valor fertilizante de la ceniza, minimizar la compactación del suelo y permitir el establecimiento rápido de una cobertura de cultivo o pastura para disminuir los riesgos de la erosión. Los métodos de desmonte en las sabanas son menos complicados pero también deben propender por un establecimiento rápido de una cobertura vegetal.

4. Las técnicas de establecimiento de pasturas a bajo costo incluyen la introducción de especies mejoradas en las sabanas nativas, la sustitución gradual de esta última, métodos de siembra a baja densidad y el intercalamiento en relevo de cultivos-pasturas. Las técnicas de mantenimiento de pasturas deben considerar la frecuencia de las aplicaciones de fertilizantes.

5. Se puede lograr una mayor protección del suelo mediante el uso de coberturas de suelo a base de cultivos anuales y abonos verdes, aunque los resultados no siempre son positivos. El uso de cultivos intercalados y sistemas agrosilviculturales no se ha caracterizado y cuantificado adecuadamente.

6. Las limitaciones impuestas por la acidez del suelo se pueden atenuar sin tener que hacer aplicaciones masivas de cal mediante (a) el uso de especies y variedades tolerantes a las toxicidades de aluminio y manganeso, (b) la aplicación de suficiente cal para satisfacer los requerimientos de calcio y magnesio de las plantas, (c) la aplicación de suficiente cal para disminuir la saturación de aluminio por debajo de niveles tóxicos y (d) el estímulo del movimiento descendente del calcio y el magnesio hacia el subsuelo.

7. El manejo eficiente del fósforo en estos suelos consiste en (a) determinar la combinación más apropiada de las dosis y métodos de aplicación que favorezcan los efectos iniciales y residuales, (b) mejorar los métodos de evaluación de la fertilidad del suelo para hacer recomendaciones de fertilizantes, (c) utilizar fuentes menos costosas tales como las rocas fosfatadas, (d) seleccionar especies y variedades que exhiban un buen comportamiento a niveles más bajos de fósforo disponible en el suelo y (e) explorar la posibilidad práctica de hacer inoculaciones de micorrizas para aumentar la absorción de fósforo por las plantas.

8. Las principales tecnologías de bajos insumos para manejar la baja fertilidad natural del suelo se concentran en (a) la máxima utilización de la fijación de nitrógeno por leguminosas utilizando rizobios tolerantes a la acidez, (b) el aumento de la eficiencia de la fertilización con nitrógeno y potasio, (c) la identificación y corrección de las deficiencias de azufre y micronutrientes y

(d) la promoción del reciclaje de nutrimentos.

9. Se han expresado dudas con respecto a que el uso de plantas tolerantes a las limitaciones de los suelos ácidos puede agotar completamente las bajas reservas de nutrimentos de los Oxisoles y Ultisoles y volverlos totalmente inútiles. Un análisis de las reservas nutricionales totales de dichos suelos, de la remoción de nutrimentos por cultivos y pasturas y de las cantidades de fertilizantes que se deben adicionar no evidencia el agotamiento de las reservas del suelo, sino un aumento gradual en el nivel total de fósforo y otros nutrimentos en el suelo. Como las tecnologías de bajos insumos descritas en esta revisión incluyen la fertilización, el argumento sobre la minería del suelo tiene poca validez.

Cuadro 1. Distribución generalizada del área de suelos en los trópicos en base a datos tabulados de FAO-UNESCO (1971-1979) con modificaciones indicadas.

Asociaciones de Suelos dominadas por	América Tropical ^{1/}	África Tropical ^{2/}	Asia Tropical ^{3/}	Australia Tropical ^{4/}	Total	% de los Trópicos
-----millones ha-----						
Oxisoles	502	316	15	-	833	23
Ultisoles	320	135	286	8	749	20
Entisoles	124	282	75	93	574	16
Alfisolos	183	198	123	55	559	15
Inceptisoles	204	156	169	3	532	14
Vertisoles	20	46	56	31	153	5
Aridisoles	30	1	23	33	87	2
Mollisoles	65	-	9	0	74	2
Andisoles	31	1	11	0	43	1
Histosoles	4	5	27	-	36	1
Spodosoles	10	3	6	1	20	1
Total	1493	1143	810	224	3670	100

1/ De 23°N - 23°S, actualizado por Sánchez, P.A.

2/ Areas con más de 150 días de época lluviosa. Fuente: Duda! (1980).

3/ Incluye regiones templadas de la India, Bangladés e Indochina más Papua Nueva Guinea.

4/ Norte del Trópico de Capricornio. Fuente: Sánchez and Isbell (1979).

Cuadro 2. Extensión geográfica de las principales limitaciones edáficas en América tropical (23°Norte-23°Sud) y en las regiones dominadas por suelos ácidos e infértiles.

Limitación Edáfica	América Tropical (1493 millones ha)		Región Suelos Ácidos e Infértiles (1043 millones ha)	
	Millones hectáreas	Porcentaje Area total	Millones hectáreas	Porcentaje Area total
Deficiencia de N	1332	89	969	93
Deficiencia de P	1217	82	1002	96
Deficiencia de K	799	54	799	77
Alta fijación de P	788	53	672	64
Toxicidad de Al	756	51	756	72
Deficiencia de S	756	51	745	71
Deficiencia de Zn	741	50	645	62
Deficiencia de Ca	732	49	732	70
Deficiencia de Mg	731	49	739	70
Estres de H ₂ O >3 meses	634	42	299	29
Baja capacidad de retención H ₂ O	626	42	583	56
Baja CICE*	620	41	577	55
Alta erosión	543	36	304	29
Deficiencia de Cu	310	21	310	30
Posibilidad de inundación	306	20	123	12
Compactación del suelo	169	11	169	16
Presencia de Laterita	126	8	81	8
Deficiencia de Fe	96	6	?	?
Suelos ácidos sulfatados	2	0	2	0
Toxicidad de Mn	?	?	?	?
Deficiencia de B	?	?	?	?
Deficiencia de Mo.	?	?	?	?

Fuente : Sánchez y Cochrane, 1980.

* CICE = Al interc. + Ca interc. + Mg interc. + K interc.

Cuadro 3. Reducciones en el fertilizante recomendado y en las dosis de aplicación de cal al requerir solamente 80% del rendimiento máximo. Ejemplos de regiones con Oxisoles y Ultisoles. Efectos residuales indicados con "R".

Localidad	Cultivo	Insumo	Rendimiento Máximo	Dosis del insumo para producir		Reducción de la dosis de fertilizante		Fuente
				Rendimiento Máximo (RM)	80% RM	80% RM		
			ton/ha/cultivo	kg/ha		%		
Brasilia, Br.	Maíz (6) ^{1/}	P ₂ O ₅ (R)	7.0	563	282	50		NCSU (1978)
Brasilia, Br.	Maíz (5)	Cal (R)	5.6	8000	2000	75		NCSU (1978)
Brasilia, Br.	Maíz (1)	K	4.9	249	60	76		NCSU (1978)
Brasilia, Br.	Soya (1)	P ₂ O ₅	3.2	1200	300	75		CPAC (1976)
Brasilia, Br.	Trigo (1)	P ₂ O ₅	2.4	800	200	75		CPAC (1976)
Orocovis, P.R.	Pasto Elefante	N	53.0	1792	746	58		Vicente- Chandler et al. (1964)
Carimagua, Col.	Yuca (42)	Cal	8.0	6000	1700	72		CIAT (1978)
Carimagua, Col.	Maíz (20)	Cal	3.2	6000	2200	63		CIAT (1978)
Carimagua, Col.	Arroz (96)	Cal	2.8	6000	3500	42		CIAT (1978)
Carimagua, Col.	Sorgo (240)	Cal	3.1	6000	1800	70		CIAT (1978)
Carimagua, Col.	Frijol (49)	Cal	1.0	6000	4000	33		CIAT (1978)

^{1/} Número en paréntesis indica número de cultivos cosechados.

Cuadro 4. Algunos cultivos alimenticios importantes considerados generalmente como tolerantes de las condiciones ácidas del suelo en los trópicos.

Especies generalmente tolerantes:

Yuca (Manihot esculenta)
Cowpea (Vigna unguiculata)
Maní (Arachis hypogaea)
Guisante (Cajanus cajan)
Banano (Musa paradisiaca)
Arroz (Oryza sativa)
Papa (Solanum tuberosum)

Especies generalmente susceptibles con variedades tolerantes a la acidez:

Frijol (Phaseolus vulgaris)
Maíz (Zea mays)
Sorgo (Sorghum bicolor)
Soya (Glycine max)
Batata dulce (Ipomea batatas)
Trigo (Triticum aestivum)

Cuadro 5. El efecto del nivel de la fertilidad del suelo sobre el índice de área foliar y concentración de nutrimentos en la hoja de yuca, variedad M Mex 59, seis meses después de plantada

Nivel de Fertilidad	Índice de Área Foliar	Concentrac.de Nutrimentos			Contenido del Nutrimento por unidad de área Foliar		
		N	P	K	N	P	K
		-----%-----			-----mg/dm ² -----		
Alto	5.39	3.69	0.25	2.00	18.9	1.28	10.3
Medio	3.54	3.68	0.19	1.40	20.2	1.04	7.7
Bajo	1.65	3.52	0.18	0.73	21.7	1.11	4.5

Fuente : Cock (1981).

Cuadro 6. Algunos cultivos frutícolas importantes considerados generalmente como tolerantes a las condiciones ácidas del suelo en los trópicos.

Nombre Común	Nombre Científico	Fuente*
Banana	<u>Musa sapientis</u>	2
Carambola	<u>Averrhoa carambola</u>	1
Marañón	<u>Anacardium occidentale</u>	1
Coco	<u>Cocos nucifera</u>	1
Granadilla	<u>Passiflora edulis</u>	1
Pomelo	<u>Citrus paradisi</u>	1
Guayaba	<u>Psidium guajava</u>	2
Lima	<u>Citrus aurantiifolia</u>	1
Mango	<u>Mangifera indica</u>	1
Naranja	<u>Citrus sinensis</u>	1
Piña	<u>Ananas comosus</u>	1

* 1: Duke, 1978; 2: Autores

Cuadro 7. Algunos cultivos perennes y forestales importantes considerados como tolerantes a las condiciones ácidas del suelo en los trópicos.

Nombre Común	Nombre Científico	Fuente
Nuez	<u>Bertholletia excelsa</u>	1
Café	<u>Coffea arabica</u>	1
Eucalipto	<u>Eucalyptus grandiflora</u>	2
Gmelina	<u>Gmelina arborea</u>	2
Guaraná	<u>Paullinia cupana</u>	2
Jacarandá	<u>Dalbergia nigra</u>	2
Palma Aceitera	<u>Elaeis guineensis</u>	1
Chontaduro	<u>Guilielma gasipaes*</u>	2
Pimiento Negro	<u>Piper nigrum</u>	1
Pino	<u>Pinus caribea</u>	2
Caucho	<u>Hevea brasiliensis</u>	1
Caña de Azúcar	<u>Saccharum officinarum</u>	1

1 - Duke (1978)

2 - Alvim (1981)

* Conocido también como "pejibaye", "pijuayo", "pupunha."

Cuadro 8. Algunas especies de pastos importantes adaptados a Oxiles y Ultisoles.

Especie	Observaciones
<u>GRAMINEAS:</u>	
<u>Andropogon gayanus</u>	Buena adaptación, lanzamiento en Colombia y Brasil.
<u>Brachiaria decumbens</u>	Buena adaptación, susceptible al salivazo o mión.
<u>Brachiaria humidicola</u>	Tolerante a Al,
<u>Digitaria decumbens</u>	Adaptada pero con requerimientos altos en fertilización.
<u>Hyparrhenia rufa</u>	Adaptada, Requerimiento alto de K; baja productividad.
<u>Melinis minutiflora</u>	Adaptada pero con baja productividad.
<u>Panicum maximum</u>	Adaptada pero con requerimientos altos en fertilización.
<u>Pennisetum purpureum</u>	Adaptada para forraje de corte, altos requerimientos en fertilización.
<u>Paspalum notatum</u>	Baja productividad.
<u>Paspalum plicatulum</u>	Susceptible a enfermedades en ciertas áreas.
<u>LEGUMINOSAS:</u>	
<u>Desmodium heterophyllum</u>	Prefiere un régimen de humedad del suelo údico.
<u>Desmodium gyroides</u>	Arbusto para ramoneo
<u>Desmodium ovalifolium</u>	Contenido alto de tanino en climas ústicos y suelos bajos en azufre (<10 ppm S).
<u>Calopogonium muconoides</u>	Persistente pero baja palatabilidad.
<u>Centrosema pubescens</u>	Problema con ataque de insectos.
<u>Galactia striata</u>	Productivo solo en ciertos ecosistemas.
<u>Pueraria phaseoloides</u>	Adaptada pero no para estaciones secas largas (>5 meses)
<u>Stylosanthes capitata</u>	Solamente para ecosistemas de sabana.
<u>Stylosanthes guianensis</u>	Solo pocos ecotipos tienen tolerancia a anthracosis
<u>Stylosanthes scabra</u>	Promisoria para sabanas isotérmicas.
<u>Stylosanthes viscosa</u>	Promisoria para sabanas isotérmicas.
<u>Zornia latifolia</u>	Adaptada en sabanas isohypertérmicas pero susceptible a <u>sphaseloma</u> sp.

Fuente: CIAT (1978, 1979, 1980) y observaciones de los autores.

Cuadro 9. Contribución de nutrimentos de la ceniza y material parcialmente quemado depositados sobre un Ultisol de Yurimaguas, Perú después de la quema de un bosque de 17 años.

Nutrimento	Composición	Adiciones Totales
		kg/ha
N	1.72%	67
P	0.14%	6
K	0.97%	38
Ca	1.92%	75
Mg	0.41%	16
Fe	0.19	7.6
Mn	0.19%	7.3
Zn	132 ppm	0.3
Cu	79 ppm	0.3

Fuente : Seubert, et al. (1977).

Cuadro 10. Efectos de métodos de apertura de bosque sobre los rendimientos de varios cultivos en Yurimaguas, Perú. (Rendimiento es promedio del número de cosechas indicado en paréntesis).

Cultivo	Nivel de Fertilidad*	Tumba y Quema	Bulldozer	Bulldozer Quema
		-----ton/ha**-----		%
Arroz de secano (3)	0	1.3	0.7	53
	NPK	3.0	1.5	49
	NPKC	2.9	2.3	80
Maíz (1)	0	0.1	0.0	0
	NPK	0.4	0.04	10
	NPKC	3.1	2.4	76
Soya (2)	0	0.7	0.2	24
	NPK	1.0	0.3	34
	NPKC	2.7	1.8	67
Yuca (2)	0	15.4	6.4	42
	NPK	18.9	14.9	78
	NPKC	25.6	24.9	97
<u>Panicum maximum</u> (6 cortes/año)	0	12.3	8.3	68
	NPK	25.2	17.2	68
	NPKC	32.2	24.2	75
Rendimiento relativo promedio	0			37
	NPK			47
	NPKC			48

* 50 kg N/ha, 172 kg P/ha, 40 kg K/ha, 4 ton/ha cal (C).

** Rendimientos en grano de arroz de secano, maíz y soya, rendimientos de raíz fresca de yuca, producción anual de materia seca de Panicum maximum.

Fuente : Seubert, et al. (1977)

Cuadro 11. Efectos de métodos de apertura de bosque sobre la tasa de infiltración del agua en Ultisoles de Yurimaguas, Perú; Manaus y Barrolandia (Bahia), Brasil.

Método de Apertura	Yurimaguas Perú	Manaus, AM Brasil	Barrolandia, BA Brasil
	-----cm/hr-----		
Bosque no disturbado	26	15	24
Tumba y quema (1 año)	10	-	20
Bulldozer (1 año)	0.5	-	3
Tumba y quema y 5 años en pastura	-	0.4	-

Fuentes: NCSU (1972); Seubert et al (1977); Schubart (1977) y Silva (1978).

Cuadro 12. Resumen de cambios en las propiedades químicas de la capa arable antes y poco después de quemar bosques en Ultisoles y Oxisoles del Amazonas.

Propiedad del Suelo	Tiempo	Yurimaguas ^{1/} (2 sitios)		Manaus ^{2/} (\bar{X} 7 sitios)	Manaus ^{3/} (1 sitio)	Belem ^{4/} \bar{X} 60 sitios)	Barroilandia ^{5/} Bahia (1 sitio)
		I	II				
Meses después de quemar:		1	3	0.5	4	12	1
pH (en H ₂ O)	Antes:	4.0	4.0	3.8	4.1	4.8	4.6
	Después:	4.5	4.8	4.5	5.5	4.9	5.2
Ca+Mg Intercamb. (meq/100g)	Antes:	0.41	1.46	0.35	0.92	1.03	1.40
	Después:	0.88	4.08	1.25	5.44	1.97	4.40
	Δ	0.47	2.62	0.90	4.52	0.94	3.00
K intercamb. (meq/100g)	Antes:	0.10	0.33	0.07	0.08	0.12	0.07
	Después:	0.32	0.24	0.22	0.23	0.12	0.16
	Δ	0.22	(0.07)	0.15	0.15	0.00	0.09
Al intercamb. (meq/100g)	Antes:	2.27	2.15	1.73	1.81	1.62	0.75
	Después:	1.70	0.65	0.70	0.10	0.90	0.28
	Δ	(0.59)	(1.50)	(1.03)	(1.71)	(0.72)	(0.45)
Sat. Al (%)	Antes:	81	52	80	64	58	34
	Después:	59	12	32	2	30	5
	Δ	(22)	(40)	(48)	(62)	(28)	(29)
P disponible (ppm) (Olsen en Perú, Mehlich-2 en Brasil)	Antes:	5	15	-	2	6.3	1.5
	Después:	16	23	-	5	7.5	8.5
	Δ	11	8	-	3	1.2	7.0

Calculado de datos provenientes de: 1/ Seubert et al. (1977) y Villachica and Sánchez (datos no publicados)

2/ Brinkmann and Nascimento (1973)

3/ UEPAE de Manaus (1979)

4/ Hecht (datos no publicados)

5/ Silva (1978).

Cuadro 13. Efecto del método de siembra, distancia y densidad de siembra sobre los rendimientos de la variedad IR8 de arroz de secano en un Aeric Tropaqualf en Yurimaguas, Perú.

Método de siembra y distancia	Densidad de Siembra	Rendimiento en grano
	kg/ha	ton/ha
Roturado con 2 surcos de siembra (surcos a 25 cm)	50	5.93
Sin labranza, huecos con "tacarpo" 25 x 25 cm.	35	5.63
Sin labranza, huecos con "tacarpo" 50 x 50 cm.	18	4.25
LSD.05		0.31

Fuente : Sánchez and Nureña (1972).

Cuadro 14. Habilidad de diferentes especies de pastos para invadir y desplazar sabana nativa fertilizada con grados diferentes de control y labranza en Oxisoles de Carimagua, Colombia.

Tratamiento de sabana nativa	Especies capaces de	
	Invadir	Desplazar
Quema	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. radicans</u>	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u>
Control químico	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. humidicola</u> <u>B. radicans</u>	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. humidicola</u>
Cultivadora a 12 cm.	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. humidicola</u> <u>B. decumbens</u> <u>A. gayanus</u> <u>B. radicans</u>	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. humidicola</u> <u>B. decumbens</u> <u>A. gayanus</u>
Preparación completa de la cama de la semilla	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. humidicola</u> <u>B. decumbens</u> <u>A. gayanus</u> <u>B. radicans</u>	<u>D. ovalifolium</u> <u>P. phaseoloides</u> <u>B. humidicola</u> <u>B. decumbens</u> <u>A. gayanus</u> <u>B. radicans</u>

Fuente : CIAT (1980)

Cuadro 15. Producción de cultivos y pastura en monocultivo y sistemas intercalados establecidos simultáneamente en un Ultisol de Quilichao, Colombia. Fertilización con 0.5 ton/ha cal dolomítica y 100 kg P₂O₅/ha como superfosfato triple.

Especie		Rendimiento del cultivo			Pastura (Materia Seca)			Suma de RY	
Cultivo	Pastura* (# cortes)	Monocul tivo	Interca lado	RY**	Monocul tivo	Interca lado	RY	RY	
		-----ton/ha-----			%	-----ton/ha-----		%	%
Yuca (raíces)	<u>S.g.</u> (3)	45.6	38.2	84	2.1	1.0	48	132	
"	<u>B.d.</u> + <u>S.g.</u> (3)	42.4	17.0	40	7.0	6.4	92	130	
Frijol (grano)	<u>S.g.</u> (1)	1.08	1.08	100	0.80	0.37	40	146	
"	<u>B.d.</u> + <u>S.g.</u> (1)	1.22	1.24	102	1.70	0.93	55	157	

* S.g. = Stylosanthes guianensis 136; B.d. = Brachiaria decumbens 606.

** RY = Rendimiento relativo = $\frac{\text{Intercalado}}{\text{Monocultivo}} \times 100$

Fuente : Adpatado de CIAT (1979).

Cuadro 16. Efectos del tipo de cobertura al suelo sobre los rendimientos de maíz en un Haplustox Típico próximo a Brasilia, Brasil (Promedios de variedades y otros tratamientos de manejo por estación.

Tratamiento al suelo	Estación Lluviosa	Estación Seca (con riego)
	-----Rendimientos en grano (ton/ha)-----	
Sin cobertura	6.16	5.93
Cobertura de <u>Melinis minutiflora</u>	6.54	5.99
Cobertura con plástico negro	-	6.75

Fuentes: Bandy (1976), NCSU (1976).

Cuadro 17. Efecto total de la cobertura del suelo con Panicum maximum sobre los rendimientos en grano de varios cultivos en un Paleudult Típico de Yurimaguas, Perú.

Cultivo	Número de Cosechas	Con Cobertura	Sin Cobertura
--Rendimientos en grano(ton/ha)--			
Arroz de secano	7	2.10	2.71
Maíz	4	3.94	3.56
Soya	6	2.34	2.29
Maní	4	2.96	2.88
Cowpea	1	0.64	0.74
Promedio de Rendimiento 20		2.56	2.49

Fuente : Valverde and Bandy (1981).

Cuadro 18. Efecto total de la cobertura aplicada al suelo e incorporaciones de abono verde en tratamientos no fertilizados en relación a los rendimientos obtenidos en los tratamientos fertilizados sin cobertura y sin incorporación de abono verde de 5 cultivos consecutivos. Números en paréntesis son rendimientos en grano (ton/ha) que fueron igualados a 100%. Yurimaguas, 1974-1975.

Tratamientos (todos sin fertilizar)	1er.Cultivo Soya (1.10)	2do.Cultivo Cowpea (0.74)	3er.Cultivo Maíz (4.17)	4° Cultivo Maní (2.88)	5° Cultivo Arroz (2.74)	Efecto Promedio
-----% del rendimiento sin cobertura y tratamientos altos con NPK y Cal-----						
Suelo desnudo	9	59	33	55	64	44
Cobertura con Guinea	14	103	57	52	94	64
Guinea incorporada	33	90	70	69	94	71
Cobertura con Kudzú	-	97	72	63	90	80
Kudzú incorporado	109	77	88	79	99	90

Fuentes : NCSU (1976), Wade (1978).

Cuadro 19. Sistemas intensivos de cultivos intercalados produciendo 4 a 5 cultivos por año en comparación con los mismos cultivos en monocultivo en un Paleuduit Típico de Yurimaguas, Perú. Cultivos espaciados en surcos de 2 m.

Primer Año	Maíz	Soya	Yuca	Cowpea	Valor total en el mercado.	% sobre monocultivo	
	Rendimiento en grano o tubérculo (ton/ha) US\$/ha.						
Intercalado	154	0.83	11.7	0.54	1055	20	
Monocultivo	3.35	1.15	16.8	1.05	879	-	
Segundo Año	Arroz	Soya	Yuca	Maní	Cowpea	Valor total en el mercado	% sobre monocultivo
Intercalado	2.01	0.52	8.0	2.62	0.24	1996	28
Monocultivo	2.38	1.19	22.9	3.05	0.47	1558	-

Fuentes: NCSU (1975, 1976), Wade (1978).

Cuadro 20. Efectos residuales de las aplicaciones de cal a un Oxisol de Brasilia en términos de cambios en las propiedades químicas de la capa arable y rendimientos relativos en grano a 6 y 66 meses después del encalado.

Cal Aplicada en 1972	pH		Al Intercamb.		Ca+Mg Intercamb.		Saturación Al		Rendimientos rela- tivos en grano	
	6*	66*	6*	66*	6*	66*	6*	66*	6*	66*
ton/ha	1:1 H ₂ O		-----meq/100 g-----				-----%-----			
0	4.7	3.9	1.1	1.5	0.6	0.3	63	80	53	50
1	5.0	4.2	0.9	1.1	1.1	0.6	45	61	85	93
2	5.1	4.3	0.5	1.0	1.5	1.0	25	46	88	88
4	5.6	4.8	0.2	0.4	3.1	2.1	6	15	100	89
8	6.3	5.2	0.0	0.1	4.4	4.0	2	2	93	100

Recopilado de: NCSU (1974; González (1976); González, et al. (1979); CPAC, 1979; Miranda, et al., (1980).

* Meses después del encalado. Los rendimientos se refieren al primer cultivo (maíz) y al séptimo cultivo consecutivo (soya). Rendimientos máximos fueron 4.0 y 2.1 ton/ha, respectivamente.

Cuadro 21. Requerimientos estimados de cal para cultivos y pasturas importantes para los Oxisoles bien drenados de los Llanos Orientales de Colombia.

Especie	Dosis de Cal	Fuente
CULTIVOS:		
	ton/ha	
Arroz (estatura alta)	0.25 - 0.5	2
Yuca	0.25 - 0.5	5
Mango	0.25 - 0.5	5
Marañón	0.25 - 0.5	5
Cítricos	0.25 - 0.5	5
Piña	0.25 - 0.5	5
Cowpea	0.5 - 1.0	5
Banana	0.5 - 1.0	5
Maíz	1.0 - 2.0	5
Frijol negro	1.0 - 2.0	5
Tabaco	1.5 - 2.0	5
Maní	1.5 - 2.0	1
Arroz (estatura baja)	2.0 +	1
PASTURAS:		
<u>Andropogon gayanus</u>	0.4	3
<u>Panicum maximum</u>	1.5	3
<u>Brachiaria decumbens</u>	1.1	
<u>Stylosanthes capitata</u>	0.5	3
<u>Zornia latifolia</u>	0.5	4
<u>Desmodium ovalifolium</u>	0.5	4
<u>Pueraria phaseoloides</u>	1.0	3
<u>Pennisetum purpureum</u>	2.6	3

Fuentes: (1) Alvarado, sin fecha; (2) Calvo, *et al.* 1977; (3) Salinas and Delgadillo, 1980; (4) Spain, 1979; (5) Spain, *et al.*, 1975

Cuadro 22. Clasificación de variedades de soya de acuerdo a niveles críticos de saturación de aluminio en el suelo (requerido para un 80% de rendimiento máximo) en Oxisoles de Paraná, Brasil

Categoría	Variedad	Nivel Crítico de saturación de Al
Muy susceptible:	Andrews	9
	Cobb	10
Moderadamente susceptible:	Florida	13
	Bragg	15
	Santa Ana	17
	Hutton	18
	Santa Rosa	18
	UFV-1	21
	Vicoja	22
	Bossier	22

Fuente: Muzilli, et al., (1978).

Cuadro 23. Rangos de tolerancia diferencial a estress de Al y/o P de gramíneas y leguminosas bajo condiciones de campo en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia.

Especie y No. de CIAT	Sin Cal			0.5 ton cal/ha		5 ton cal/ha		Rendimiento máximo de ma- teria seca
	0 kg P/ha	17 kg P/ha	227 kg P/ha	17 kg P/ha	227 kg P/ha	17 kg P/ha	227 kg P/ha	
% Saturación Al →	92% Al	90% Al	89% Al	86% Al	81% Al	26% Al	22% Al	
P (ppm-Bray II) →	1.7 P	2.1 P	11.7 P	2.3P	14.8P	1.5 P	18.3 P	
Gramíneas:	-----Categoría de Tolerancia*-----							---ton/ha---
<i>Brachiaria humidicola</i> 692	M	H	H	H	M	M	S	3.33
<i>Andropogon gayanus</i> 621	M	M	M	M	H	M	M	7.35
<i>Melinis minutiflora</i> 608	S	M	H	H	H	M	M	3.09
<i>Brachiaria decumbens</i> 606	S	S	S	S	S	M	M	3.58
<i>Panicum maximum</i> 604	S	S	S	S	M	M	H	5.86
<i>Penisetum purpureum</i>	S	S	S	S	M	M	H	6.98
% Saturación Al →	92	92	92	86	86	27	27	
P (ppm-Bray II) →	1.6	2.6	24.2	2.6	24.1	1.6	24.1	
Leguminosas:								
<i>Stylosanthes capitata</i> 1078	M	M	H	M	M	M	H	4.04
<i>Stylosanthes guianensis</i> 184	S	M	M	H	H	M	H	2.66
<i>Centrosema hybrid</i> 438	S	M	H	M	H	S	M	2.04
<i>Stylosanthes capitata</i> 1405	S	M	H	M	H	M	M	2.88
<i>Stylosanthes capitata</i> 1019	S	M	M	M	M	M	M	2.67
<i>Desmodium ovalifolium</i> 350	S	S	M	M	H	M	M	3.68
<i>Desmodium heterophyllum</i> 349	X	X	S	S	S	M	H	2.41
<i>Macroptilium</i> sp 506	X	X	M	S	M	S	M	2.96
<i>Leucaena leucocephala</i> 734	X	X	S	S	S	H	M	1.56

* X = muerte; S = supervivencia (<50% rend.max.); M = moderada (50-80% rend. max.); H = alta (>80% rend.max.)

Fuente: Adaptado de Salinas and Delgadillo (1980); CIAT (1980).

Cuadro 24. Respuesta diferencial de nueve leguminosas forrajeras a la toxicidad de manganeso en Australia.

Especie	Coefficiente de Regresión*	Categoría de Tolerancia	Nivel Crítico Interno
<u>Centrosema pubescens</u>	-0.0023	1 Tolerante	1600
<u>Stylosanthes humilis</u>	-0.0038	2	1140
<u>Lotononis bainesii</u>	-0.0039	3	1320
<u>Macroptilium lathyroides</u>	-0.0066	4	840
<u>Leucaena leucocephala</u>	-0.0077	5	550
<u>Desmodium uncinatum</u>	-0.0080	6	1160
<u>Medicago sativa</u>	-0.0102	7	380
<u>Glycine wightii</u>	-0.0128	8	560
<u>Macroptilium atropurpureum</u>	-0.0159	9 Susceptible	810

* Indica la magnitud de la producción de materia seca que disminuye al aumentar los niveles externos de manganeso.

Fuente : Andrew and Hegarty (1969).

Cuadro 25. Respuesta diferencial de cinco leguminosas forrajeras del tró-
pico a la toxicidad de manganeso en Rio de Janeiro, Brasil.

Especie	Coeficiente de Regresión	Categoría de Tolerancia
<u>Stylosanthes guianensis</u>	-0.014	1 Tolerante
<u>Glycine wightii</u>	-0.091	2
<u>Centrosema pubescens</u>	-0.162	3
<u>Macroptilium atropurpureum</u>	-0.197	4
<u>Pueraria phaseoloides</u>	-0.210	5 Suscepti- ble

Fuente : Souto and Döbereiner (1969).

Cuadro 26. Niveles de fósforo en la solución del suelo de isoterma de adsorción, niveles equivalentes de P disponible por métodos y cantidades de superfosfato triple aplicados al voleo después de 7 años y 13 cultivos continuos a un *Tropeptic Eutrorthox* de Hawaii.

P mantenido en la solución del suelo	P disponible			P aplicado al suelo		
	Bray I	Mehlich 2	Olsen	Inicial	Mantenimiento en 7 años	Total
-----ppm P-----	-----			-----kg P ₂ O ₅ /ha-----		
0.003	3	6	12	80	114	194
0.005	5	9	15	200	204	404
0.012	14	20	30	432	714	1146
0.025	28	35	44	682	1445	2127
0.05	55	57	72	1000	2050	3050
0.1	72	86	93	1363	2614	3977
0.2	144	158	154	1591	3691	5282
0.4	156	209	160	1591	4634	6225
1.6	339	337	295	3273	7566	10,839

Fuente : Adaptado de Yost and Fox (1979).

Cuadro 27. Efectividad agronómica relativa de varias rocas fosfatadas determinada por el rendimiento de *Brachiaria decumbens* en condiciones de campo en Carimagua, Colombia (suma de 13 cortes obtenida en un período de 44 meses).

Fuente de Fósforo	Fósforo aplicado (kg P ₂ O ₅ /ha)			
	25	50	100	400
	-----Rendimiento relativo (%) ^{1/} -----			
Superfosfato triple anual	(32.2) ^{2/}	(34.5)	(35.9)	(43.6)
Superfosfato triple residual	100 (21.1) ^{2/}	100 (29.4)	100 (31.2)	100 (35.8)
Florida (U.S.)	122	93	101	104
Bayovar (Perú)	120	80	103	109
Gafsa (Tunisia)	108	104	104	104
Huila (Colombia)	95	113	98	110
Pesca (Colombia)	110	82	111	116
Tennessee (U.S.)	104	76	96	108
Control: 13.6%				

^{1/} Igualando a 100% para cada nivel de aplicación

^{2/} Producción de Materia Seca en ton/ha.

Fuente : León and Fenster (1980).

Cuadro 28. Fracciones de fósforo en un Oxisol de Carimagua, Colombia en función de dosis de fósforo aplicado.

Fósforo aplicado		P disponible Bray II	P-Ca	P-Al	P-Fe	P		P Total
P_2O_5	P					Inorgánico	Orgánico	
-----kg/ha-----		-----ppm-----						
0	0	1.8	0.9	0.5	26	29.2	101	130.2
10	4.4	1.8	0.8	0.6	29	32.2	97	129.2
20	8.7	1.9	1.0	0.6	32	35.5	97	132.5
40	17.5	2.1	1.1	0.6	35	38.8	108	146.8
80	34.9	2.2	1.7	0.9	40	44.8	102	146.8
100	43.7	3.5	1.7	1.0	42	48.2	92	140.2
150	65.5	5.5	1.9	1.3	43	51.7	101	152.7
200	87.3	6.6	2.2	1.5	45	55.3	101	156.3

Fuente : CIAT (1981).

Cuadro 29. Recomendaciones de fósforo para un Haplustox Típico, arcilloso próximo a Brasilia, Brasil para la producción continua de maíz, en base a interpretaciones del análisis de suelo.

Fósforo Disponible (Mehlich-2)	Interpretación del Análisis de Suelo	Rendimiento Relativo de Maíz	Aplicación Basal al voleo	Aplicación en banda por cultivo	Total para 9 años
-----ppm-----		--% max.--	-----kg P ₂ O ₅ /ha-----		
0.0- 2.0	Extremadamente bajo	0- 25	320	80	1040
2.1- 6.0	Muy Bajo	26- 50	200	80	920
6.1-10.0	Bajo	51- 75	80	80	800
10.1-16.0	Medio	76- 90	0	70	630
>16.0	Alto	91-100	0	60	540

Fuente : Adaptado de Miranda, et al., (1980).

Cuadro 30. Efectividad agronómica de rocas fosfatadas determinada por el rendimiento de *Panicum maximum* en un Oxisol de Las Gaviotas en los Llanos Orientales de Colombia bajo condiciones de invernadero (suma de 3 cortes)

Roca Fosfatada	Categoría de Reacción**	Dosis de fósforo (mg/pote)			
		50	100	200	400
		---Rendimiento relativo (%)*---			
BRASIL:					
Abaete	Baja	11	33	52	55
Araxá	Baja	30	33	56	58
Catalão	Baja	5	6	22	38
Jacupiranga	Baja	12	13	19	51
Patos de Minas	Baja	27	42	66	72
Tapira	Baja	4	7	10	23
COLOMBIA:					
Huila	Media	58	59	84	84
Pesca	Baja	56	61	80	83
Sardinata	Baja	29	44	68	74
PERU:					
Bayóvar	Alta	99	79	104	91
VENEZUELA:					
Lobatera	Baja	56	56	65	76
TUNISIA:					
Gafsa	Alta	63	72	114	105
ESTADOS UNIDOS:					
Florida	Media	59	71	86	91
Carolina del Norte	Alta	70	78	107	108

* Rendimiento de materia seca obtenidos con superfosfato triple (SFT) considerado como 100% para cada dosis de fósforo. Rendimientos absolutos: 0.6, 13.3, 19.0, 22.2 y 22.2 g/pote con 0, 50, 100, 200 y 400 mg P/pote como SFT, respectivamente.

** Interpretados de Lehr and McClellan (1972) y fuentes no publicadas.

Fuente : León and Fenster (1979).

Cuadro 31. Efecto de la relación de roca fosfatada (RF) a superfosfato simple (SFS) y triple (SFT) sobre el rendimiento de maíz (parte aérea) en un Oxisol de Carimagua, Colombia, bajo condiciones de invernadero (suma de 2 cortes).

Fuente de Fósforo	P R : SSP / TSP				
	1 : 0	3 : 1	1 : 1	1 : 3	0 : 1
	-----Rendimiento Relativo (%) ^{1/} -----				
Superfosfato simple	-	-	-	-	100 ^{2/} (18.9) ^{3/}
Superfosfato triple	-	-	-	-	91
Florida/superfosfato simple	71	70	91	99	-
Florida/superfosfato triple	71	72	92	98	-
Pesca/superfosfato simple	27	53	75	99	-
Pesca/superfosfato triple	27	64	70	89	-
Control = 16%					

^{1/} Todas las dosis de P fueron promediadas. Tamaño gránulo usado: Minigránulo (-49+150 malla)

^{2/} Superfosfato simple igualado a 100%.

^{3/} Rendimiento de parte aérea en g/pote.

Fuente : Fenster and León (1980).

Cuadro 32. Efectos de enmiendas y aplicaciones de P al suelo sobre la cantidad de P adsorbido necesario para proveer 0.1 ppm P en la solución del suelo en un Oxisol de Brasilia, Brasil.

Nivel*	Enmienda	Fósforo Aplicado (ppm)			
		0	380	460	540
. ---Disminución en la adsorción de P(%)--					
0	Control	0	44	54	65
1	CaCO ₃	18	59	68	77
	CaSiO ₃	24	65	77	84
	Combined	18	65	71	82
2	CaCO ₃	16	62	77	85
	CaSiO ₃	28	75	82	91
	Combined	32	74	77	85

* Nivel de enmienda es relativo a la neutralización del Al intercambiable por el factor de 1 y 2, respectivamente. Aluminio intercambiable inicial 1.45 meq/100g.

Fuente : Smyth and Sánchez (1980a).

Cuadro 33. Niveles Críticos Externos de Fósforo de varias especies de pastos tropicales

Especie y numero de accesión	Nivel Crítico de P disponible (Gray-II)
	ppm P
Leguminosas:	
<u>Stylosanthes capitata</u> CIAT 1978	2.5
<u>Stylosanthes guianensis</u> CIAT 1200	2.5
<u>Zornia latifolia</u> CIAT 728	2.8
<u>Desmodium ovalifolium</u> CIAT 350	3.0
<u>Stylosanthes capitata</u> CIAT 1315	3.2
<u>Stylosanthes capitata</u> CIAT 1097	3.3
<u>Zornia</u> sp. CIAT 883	3.4
<u>Pueraria phaseoloides</u> CIAT 9900	3.5
<u>Stylosanthes capitata</u> CIAT 1019	3.5
<u>Stylosanthes capitata</u> CIAT 1338	3.6
<u>Stylosanthes guianensis</u> CIAT 1153	5.5
<u>Desmodium scorpiurus</u> CIAT 3022	8.0
<u>Macroptilium</u> sp. CIAT 536	9.5
<u>Desmodium gyroides</u> CIAT 3001	11.4
Gramíneas:	
<u>Andropogon gayanus</u> CIAT 621	5.0
<u>Brachiaria decumbens</u> CIAT 606	7.0
<u>Panicum maximum</u> CIAT 604	10.0

* Nivel de P disponible asociado con 80% de rendimiento máximo.

Fuentes: CIAT (1978, 1979, 1980).

Cuadro 34. Niveles críticos internos de fósforo asociados aproximadamente con rendimientos máximos de varias especies de pastos tropicales.

Especies	% P en el tejido	Fuente
Leguminosas:		
<u>Stylosanthes humilis</u>	0.17	1
<u>Centrosema pubescens</u>	0.16	1
<u>Desmodium intortum</u>	0.22	1
<u>Glycine wightii</u>	0.23	1
<u>Medicago sativa</u>	0.25	1
Gramíneas:		
<u>Andropogon gayanus</u>	0.11	2
<u>Brachiaria decumbens</u>	0.12	2
<u>Melinis minutiflora</u>	0.18	1
<u>Panicum maximum</u>	0.19	1
<u>Pennisetum clandestinum</u>	0.22	1
<u>Chloris gayana</u>	0.23	1
<u>Paspalum dilatatum</u>	0.25	1

Fuentes: 1. Andrew and Robins (1969, 1971)
2. CIAT (1978).

Cuadro 35. Efectos de micorriza inoculada en "suelo ácido laterítico" esterilizado de Sri Lanka sobre el crecimiento, absorción de fósforo y fijación de nitrógeno por Pueraria phaseoloides en condiciones de invernadero.

Tratamiento	Producción de Materia seca	Infección de micorriza	P en la planta	Nódulos por Pote	Reducción en C ₂ H ₄
	g/pote	%	%	No.	μmol/pote/hr
Control suelo no esterilizado	2.4	0	0.18	1	0.1
Micorriza sólo	28.8	76	0.27	230	55.0
Micorriza + 12 ppm P como RF*	31.0	67	0.28	241	69.1
Micorriza + 60 ppm P como RF*	37.8	74	0.31	354	123.4
12 ppm P como RF*	3.9	11	0.25	11	1.6
60 ppm P como RF*	24.6	0	0.25	96	24.8

* Roca Fosfórica Jordan

Fuente : Adaptado de Woidyanatha et al., (1979).

Cuadro 36. Niveles críticos tentativos externos e internos de azufre de gramíneas y leguminosas forrajeras tolerantes a la acidez desarrollados en un Oxisol de Carimagua, Colombia, bajo condiciones de invernadero (Niveles Críticos estimados de diagramas de Cate-Nelson).

Especie	Nivel Crítico Externo (Suelo)	Nivel Crítico Interno (Planta)
	ppm S*	% S
Gramíneas:		
<u>Brachiaria humidicola</u> 679	11	0.14
<u>Andropogon gayanus</u> 621	12	0.15
<u>Brachiaria decumbens</u>	13	0.16
<u>Panicum maximum</u>	14	0.15
Leguminosas:		
<u>Stylosanthes capitata</u> 1315	12	0.15
<u>Desmodium ovalifolium</u> 350	13	0.12
<u>Zornia latifolia</u> 728	14	0.14
<u>Stylosanthes capitata</u> 1019	15	0.17

Fuente : CIAT (1981)

* Extractor fosfato de calcio.

Cuadro 37. Fracciones de fósforo del suelo en el perfil de un Oxisol de Carimagua, Llanos Orientales, Colombia.

Profundidad del Suelo	pH	C Orgánico	Saturación de Bases	P Total	Porcentaje del P Total					
					P Orgánico	Ca-P	Al-P	Fe-P	P residual soluble	P Ocluido Al-P
cm		%	%	ppm	-----%					
0-6	4.5	2.26	7	185	77	0.9	0.8	10	9	1
6-15	4.6	1.84	7	151	75	0.6	0.9	11	11	1
15-40	4.6	1.13	13	126	73	0.7	1.2	6	17	1
40-70	4.9	0.53	15	114	55	0.8	1.3	7	34	1
70-100	5.1	0.43	29	90	47	0.6	1.0	9	41	1
100-150	5.1	0.24	21	84	35	0.7	1.2	4	53	4

Fuente : Benavides (1963).

Cuadro 38. Contenido de Fósforo en pasturas de Andropogon gayanus y Brachiaria decumbens bajo pastoreo con una carga animal de 1.7 an/ha en un Tropeptic Haplustox de Carimagua, Colombia. (Fertilización con 50 kg P₂O₅/ha como superfosfato triple y más pequeñas cantidades de calcio, magnesio, potasio y azufre).

Especies	Estación	Materia seca ofrecida	Contenido de P	Extracción de P	Ganancias de peso vivo
		ton/ha	%	kg P/ha	kg/ha
<u>A. gayanus</u> (promedio de 1 año)	Lluviosa	4.7	0.16	7.5	288
	Seca	5.5	0.09	4.9	-23
	Anual	10.2	0.12	12.4	265 ^{1/}
<u>B. decumbens</u> (promedio de 4 años)	Lluviosa	0.8	0.15	1.2	125
	Seca	1.6	0.13	2.1	4
	Anual	2.4	0.14	3.3	129

^{1/} Carga animal 2.4 animales/ha.

Fuente : Adaptado de Paladines y Hoyos (datos no publicados)

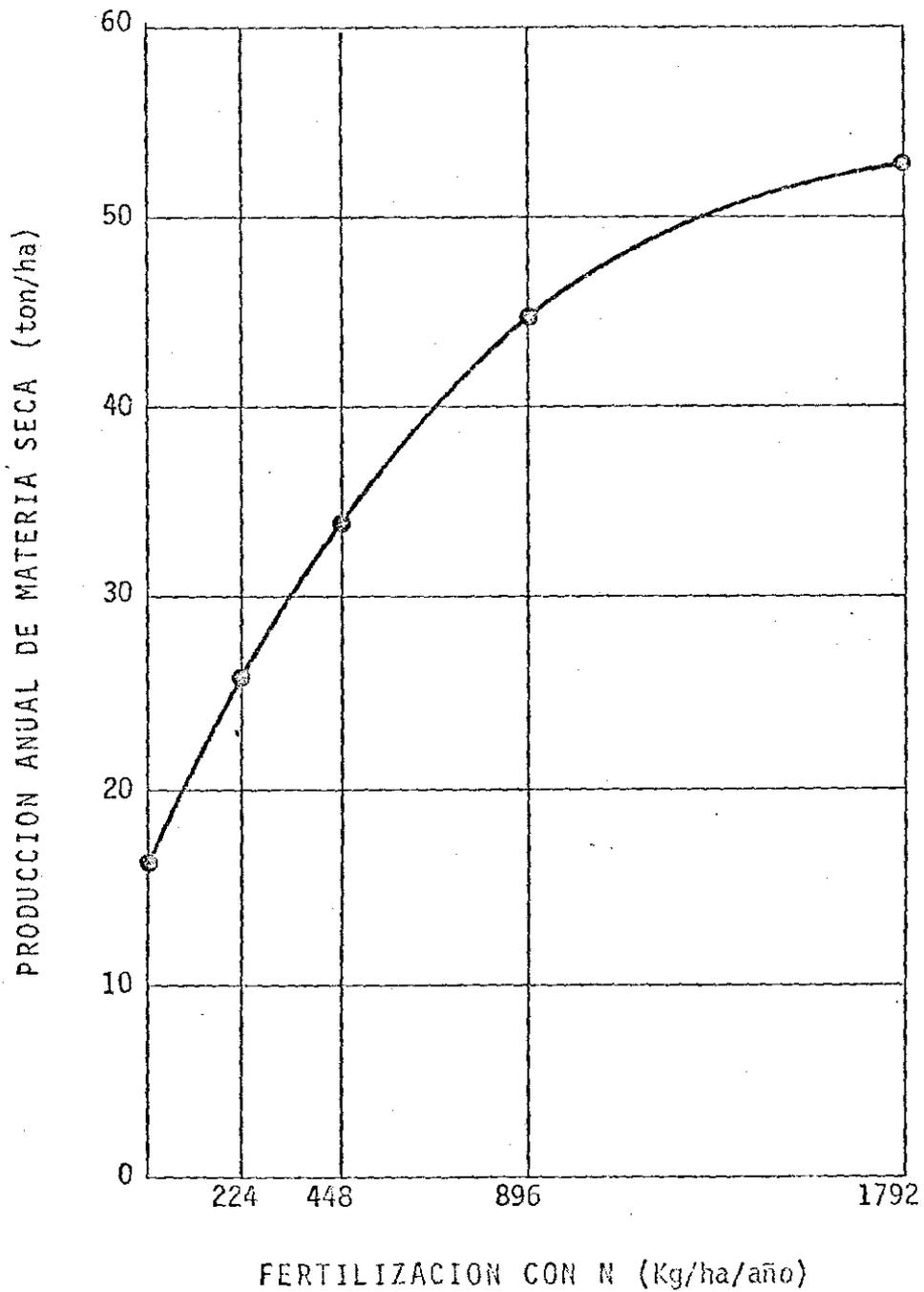


Figura 1. Producción anual de materia seca de *Pennisetum purpureum* cv. Napier bajo corte en Ultisoles de las montañas údicas de Puerto Rico bajo manejo intensivo. Fuente: Vicente-Chandler et al. (1974).

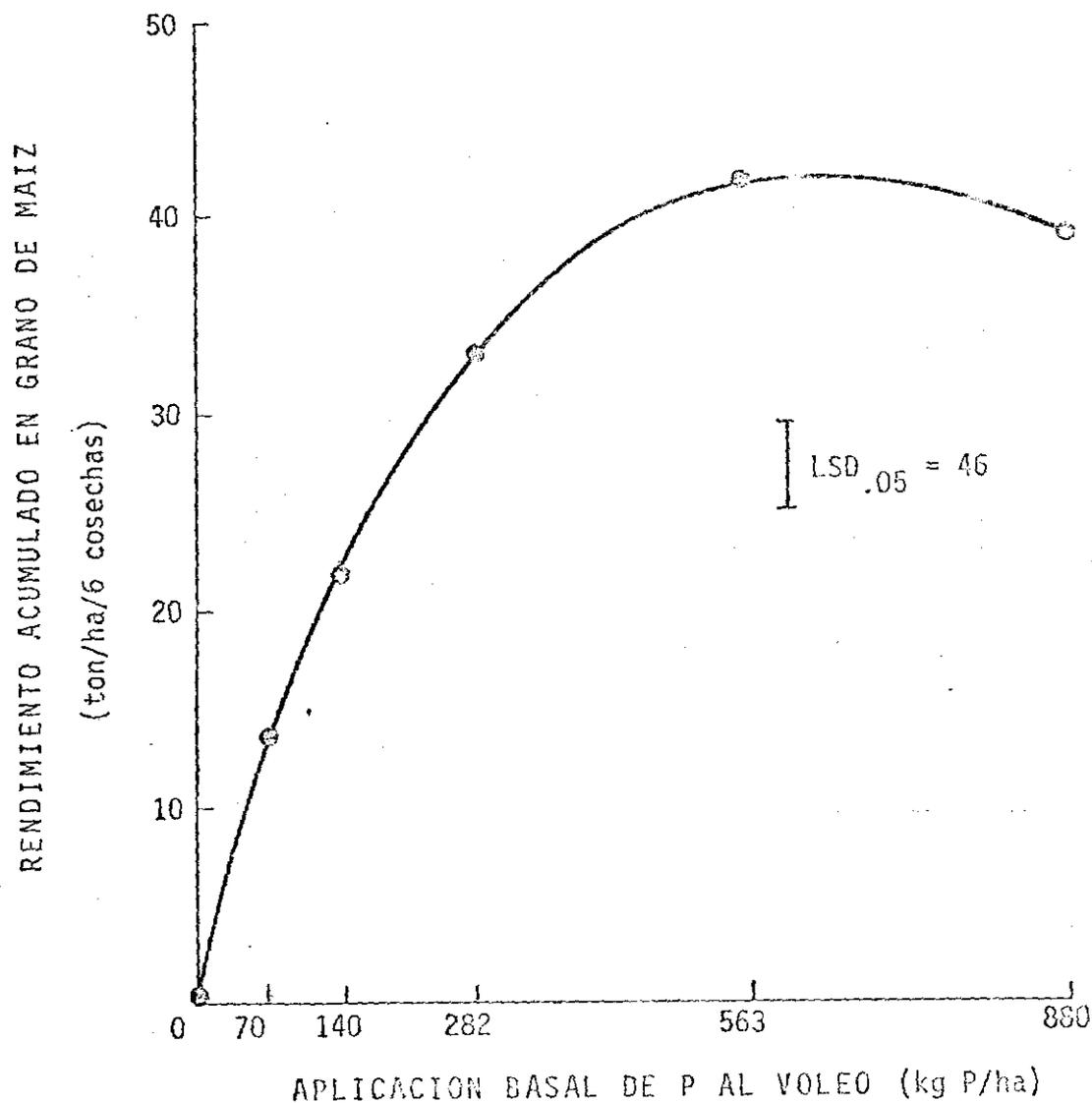


Figura 2. Respuesta del cultivo de maíz a las aplicaciones de fósforo en un Oxisol (Haplustox Típico) del Cerrado de Brasil. Rendimiento acumulado en grano de seis cultivos consecutivos. Fuente: Adaptado de North Carolina State University (1978).

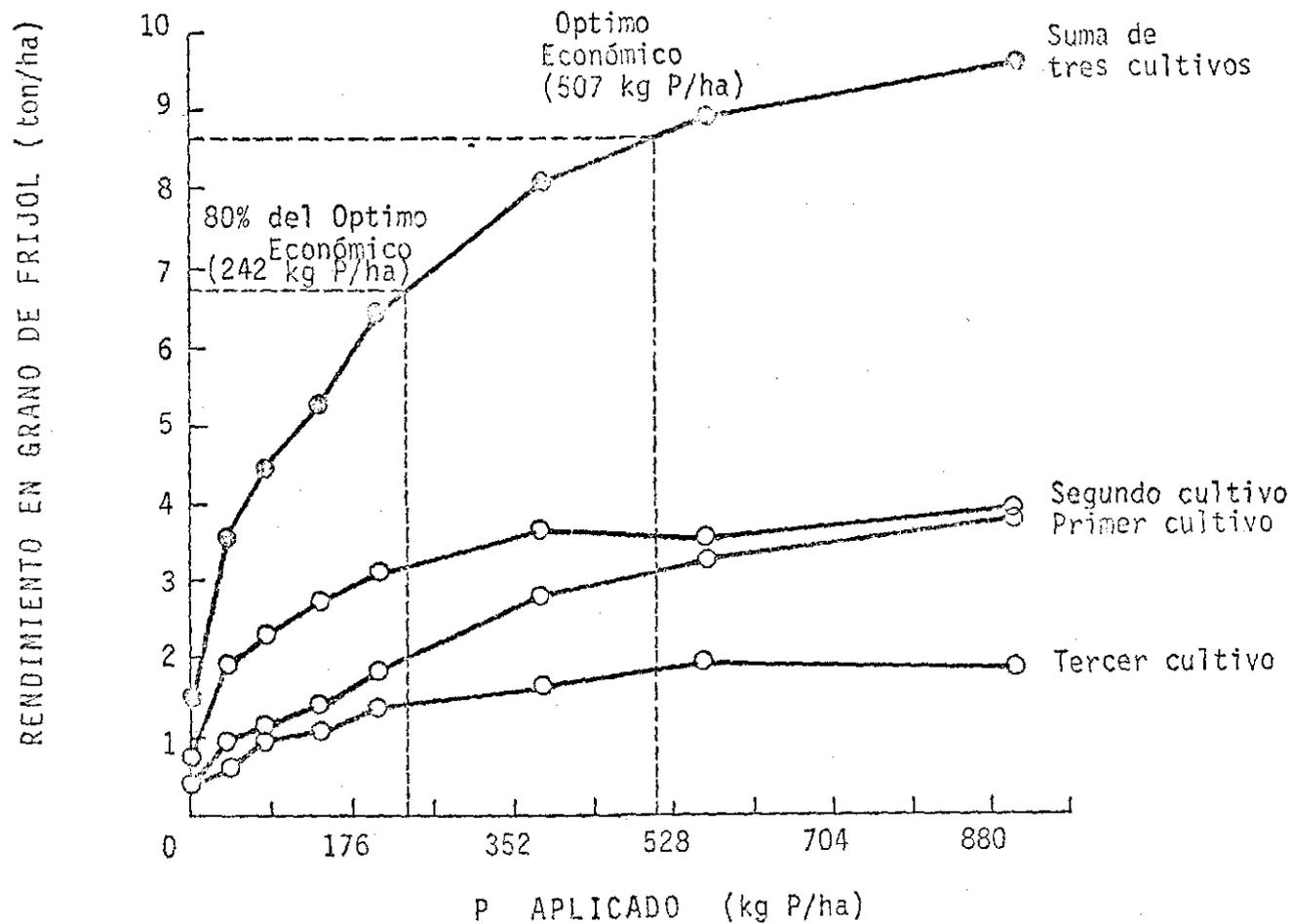


Figura 3. Respuesta del rendimiento en grano de *Phaseolus vulgaris* a la aplicación inicial de fósforo y su efecto residual sobre dos cultivos consecutivos en un Dystrandept típico en Popayán, Colombia.
Fuente: CIAT (1979)

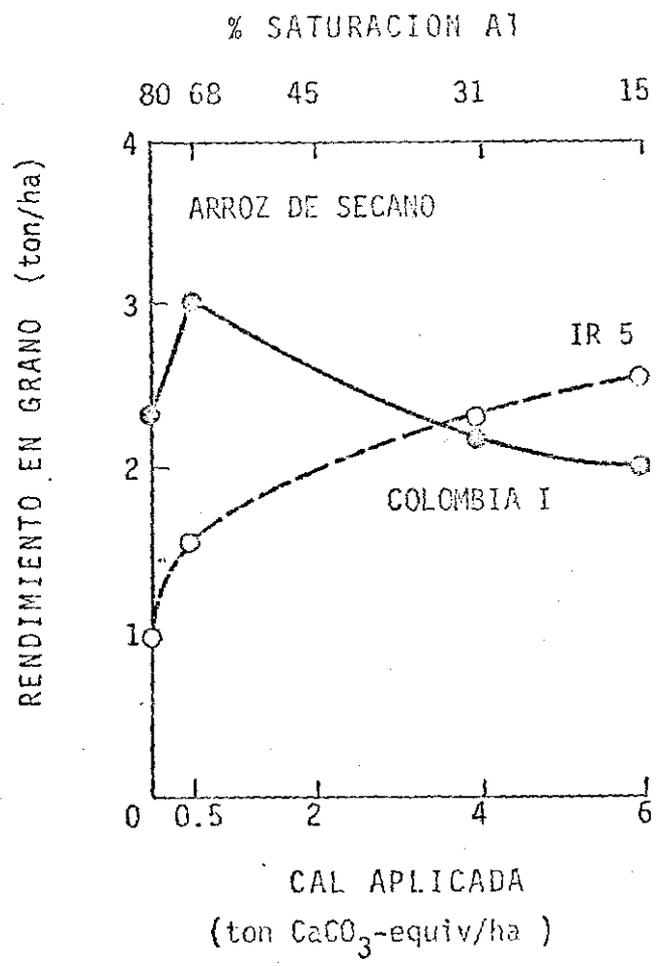


Figura 4. Respuesta diferencial a la saturación de aluminio y encalado de dos variedades de arroz cultivadas en un Tropeptic Haplustox en Carimagua, Colombia.
Fuente: Adaptado de Spain et al., (1975).

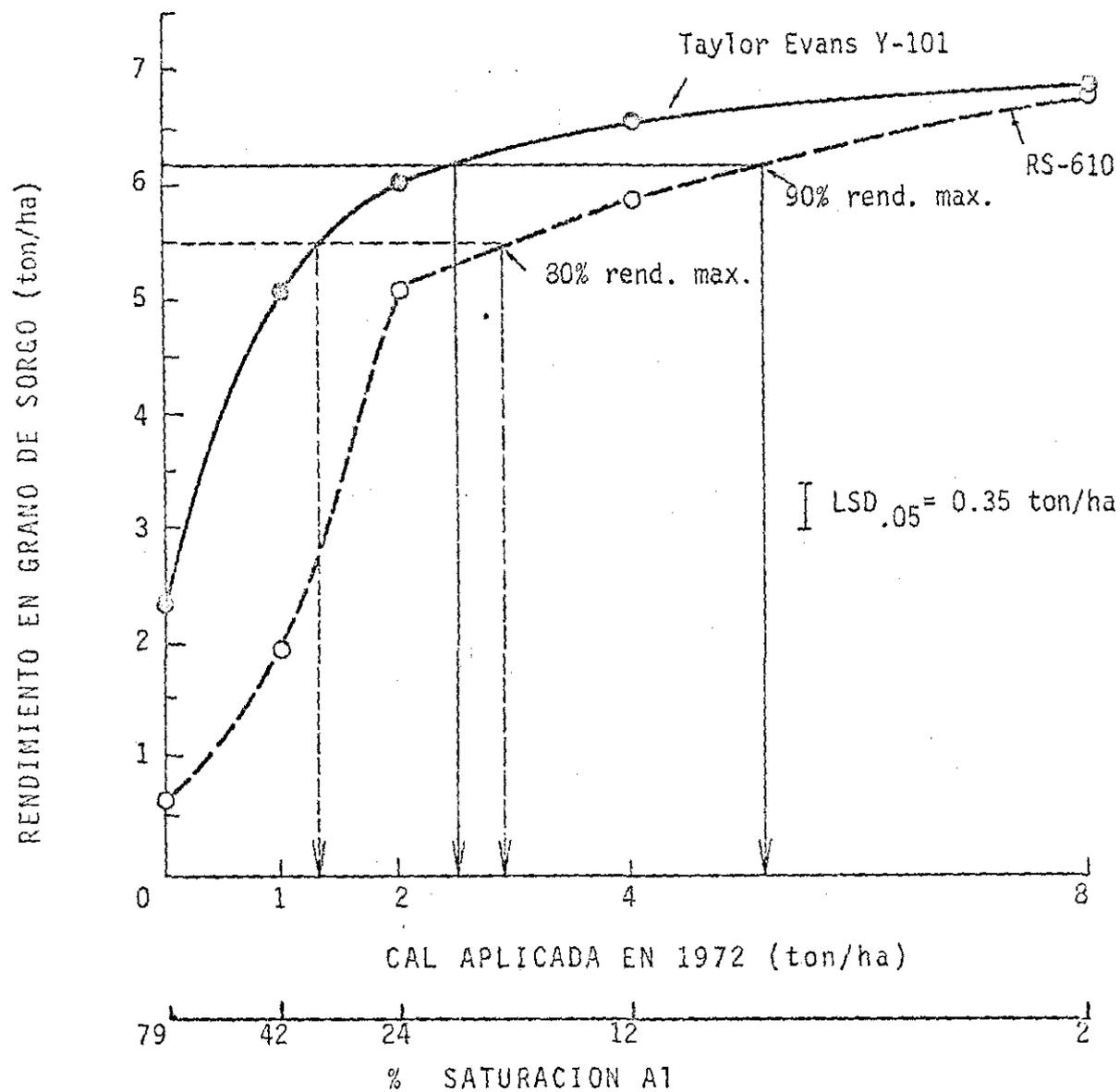


Figura 5. Respuesta diferencial de dos híbridos de sorgo al encalado en un Haplustox Típico del Cerrado de Brasil.
Fuente: Salinas (1978).

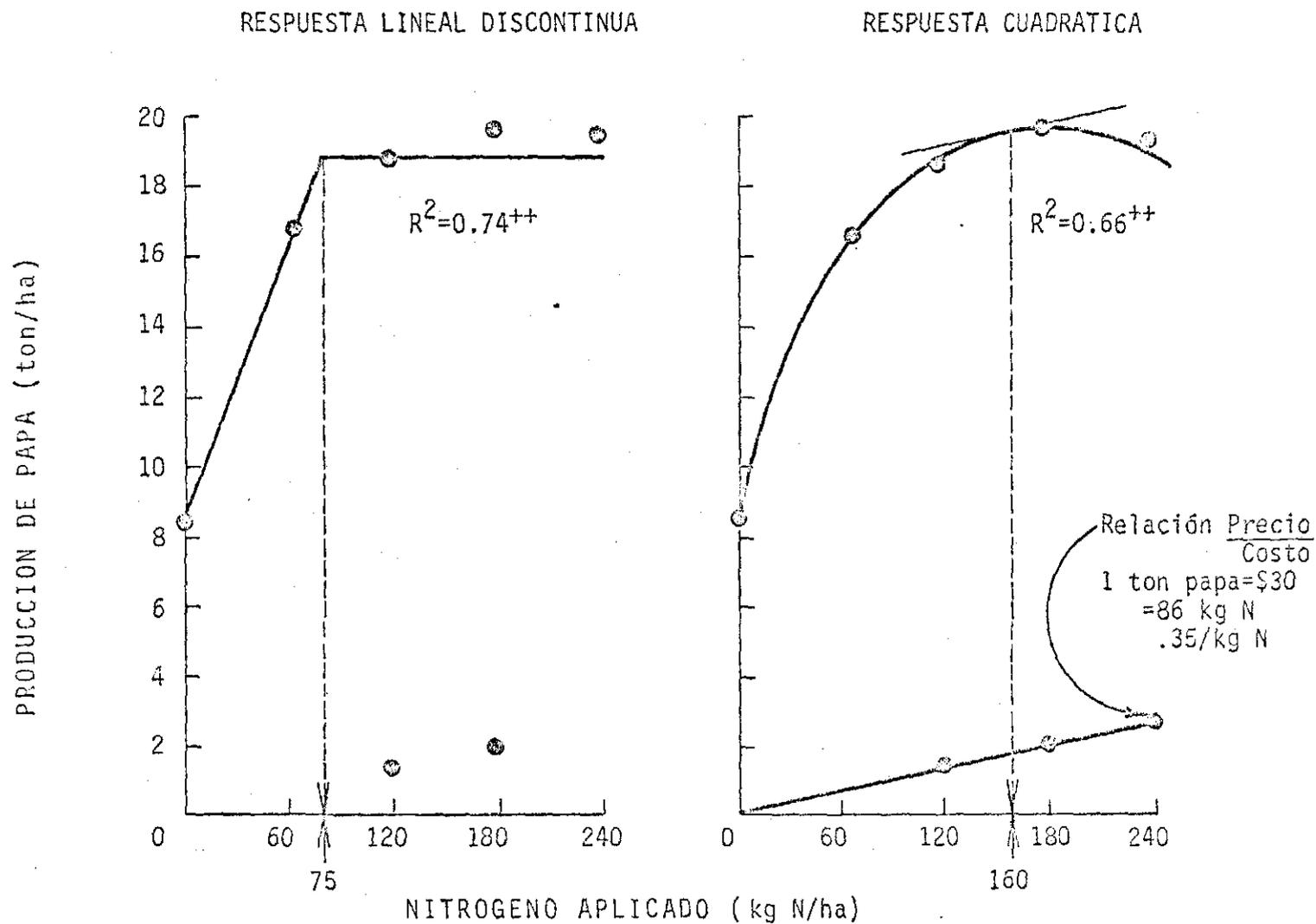


Figura 6. Determinación de la recomendación de nitrógeno para papa en una serie de experimentos de campo en Bolivia de acuerdo a los modelos de respuesta lineal discontinua y al convencional curvilíneo. Cada punto es la media de varios experimentos en una categoría dada de cultivo-suelo.

Fuente : Adaptado de Waugh, et. al., (1975).

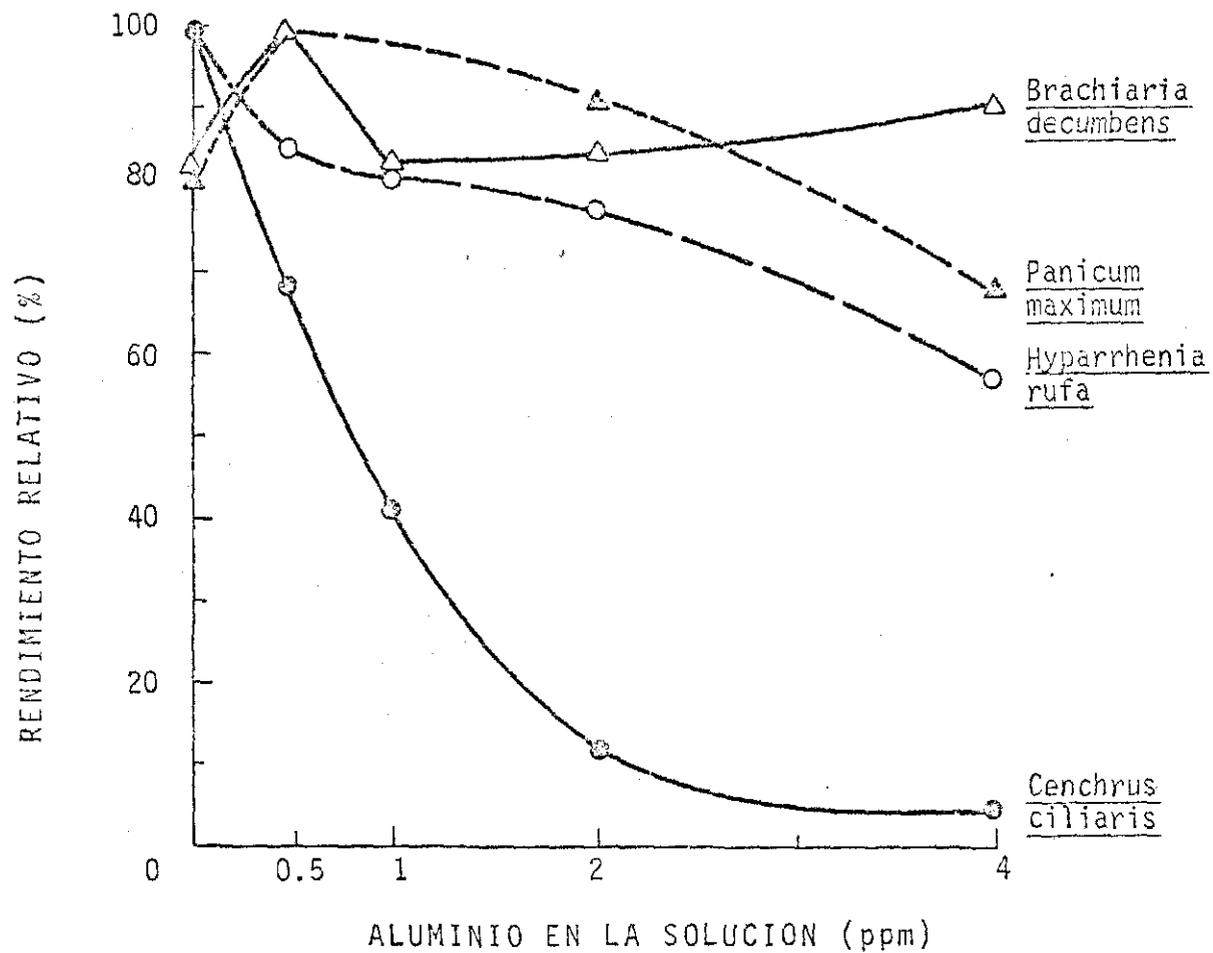


Figura 7. Respuesta diferencial de cuatro gramíneas forrajeras del trópico a la toxicidad del aluminio en solución nutritiva.
Fuente : Spain (1979).

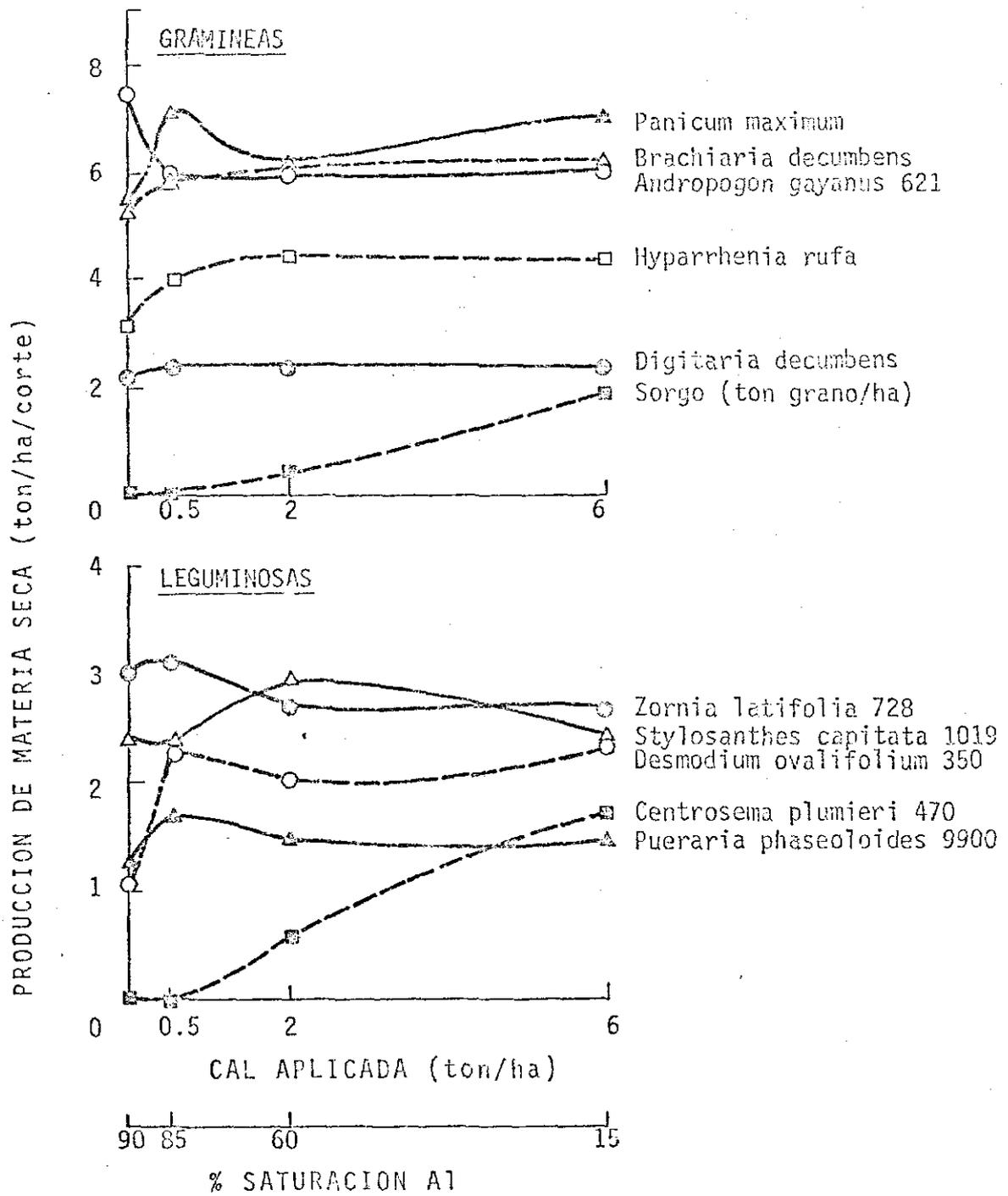


Figura 8. Respuesta de varias gramíneas y leguminosas forrajeras al encalado en un Oxisol de Carimagua, Colombia. Promedio de 4-5 cortes para las gramíneas y primer corte para leguminosas. Fuente : Adaptado de Spain (1979).

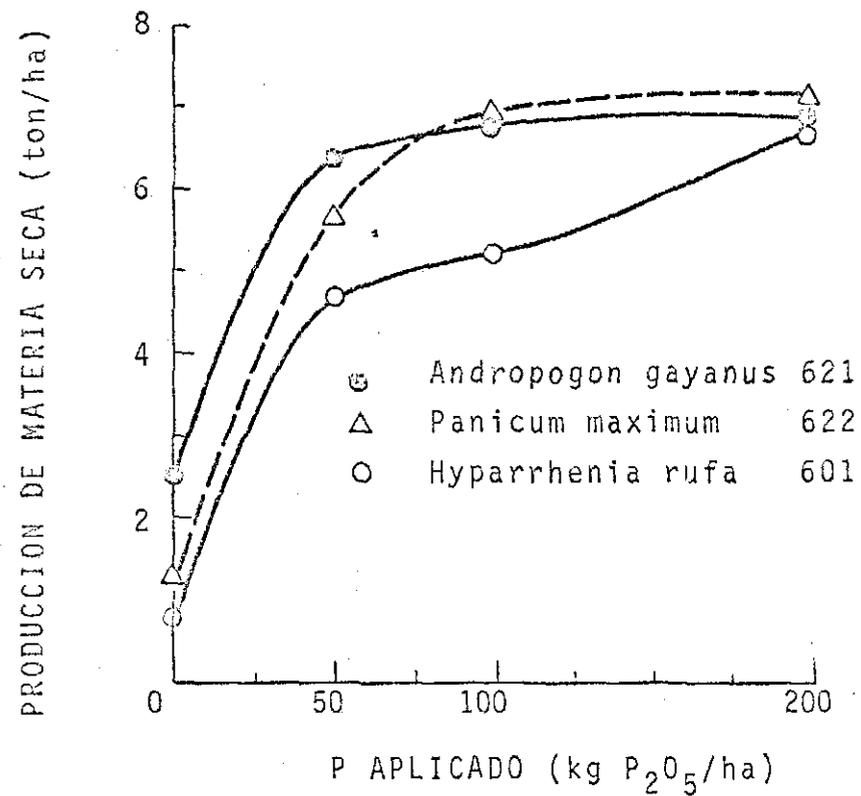


Figura 9. Respuesta diferencial de tres gramíneas forrajeras a la fertilización fosfatada durante el año de establecimiento en un Oxisol de Carimagua, Colombia. Suma de 3 cortes en época lluviosa. Todos los tratamientos recibieron 400 kg N/ha. Fuente : CIAT (1979).

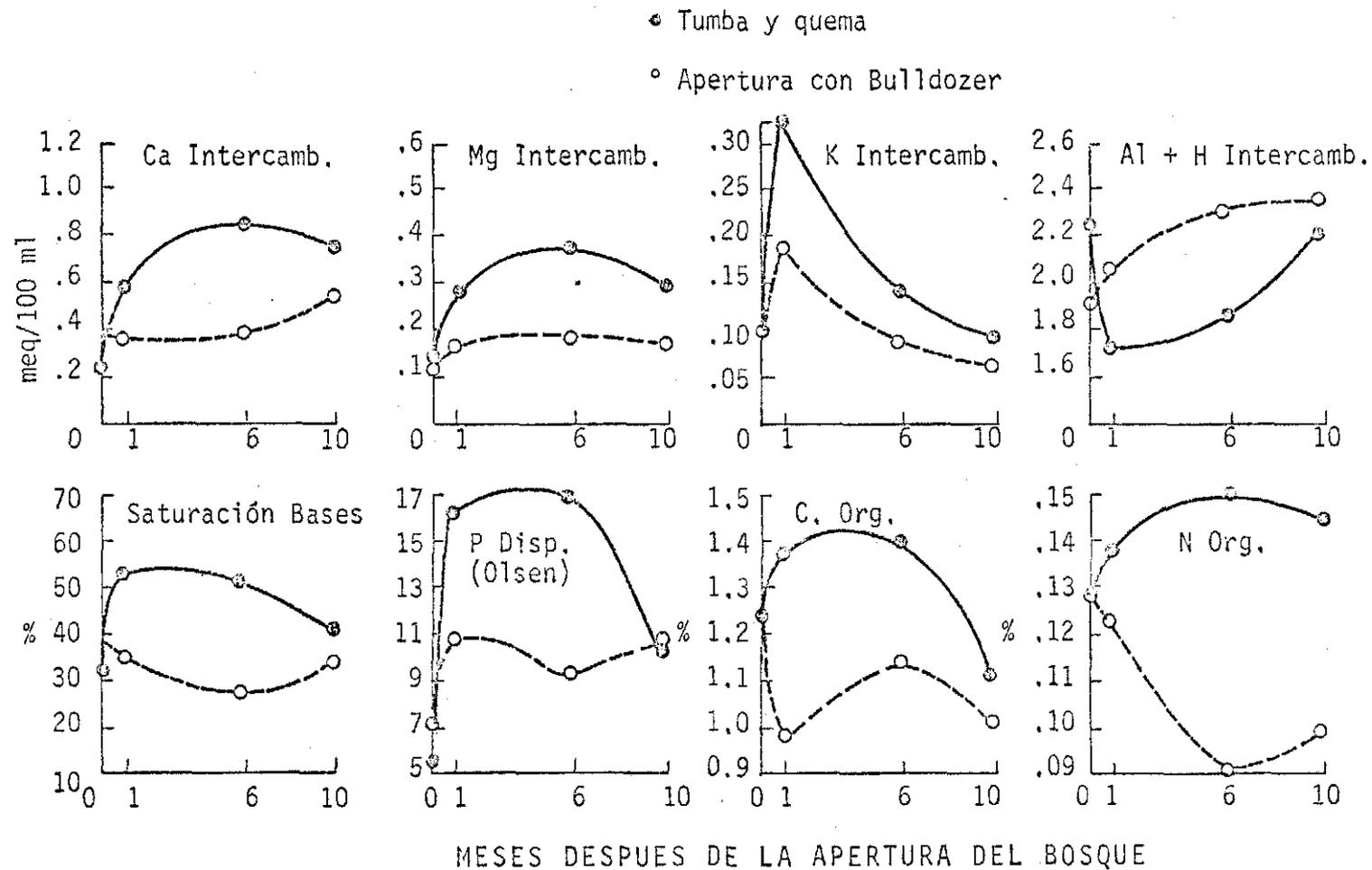


Figura 10. Efectos de dos métodos de apertura de bosque sobre los cambios en las propiedades químicas de la capa superficial (0-10 cm) de un Paleudult Típico de Yurimaguas, Perú.

Fuente : Seubert *et al.*, (1977).

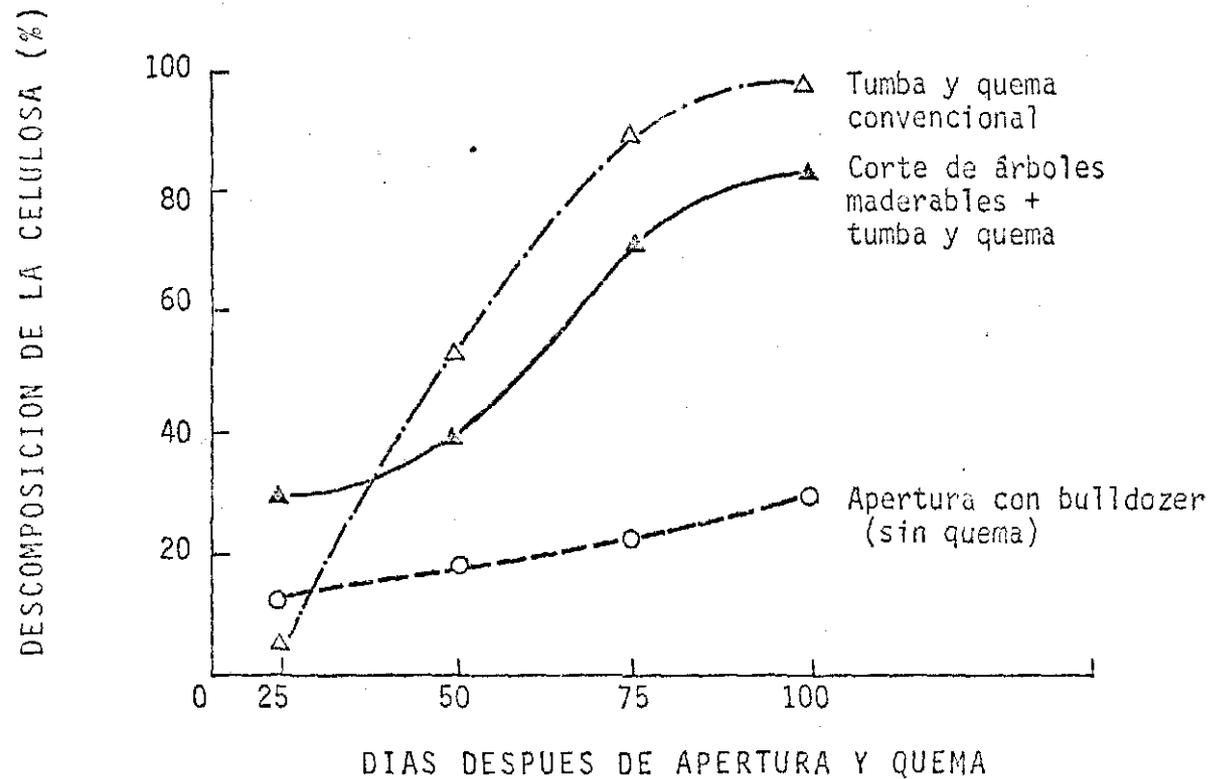
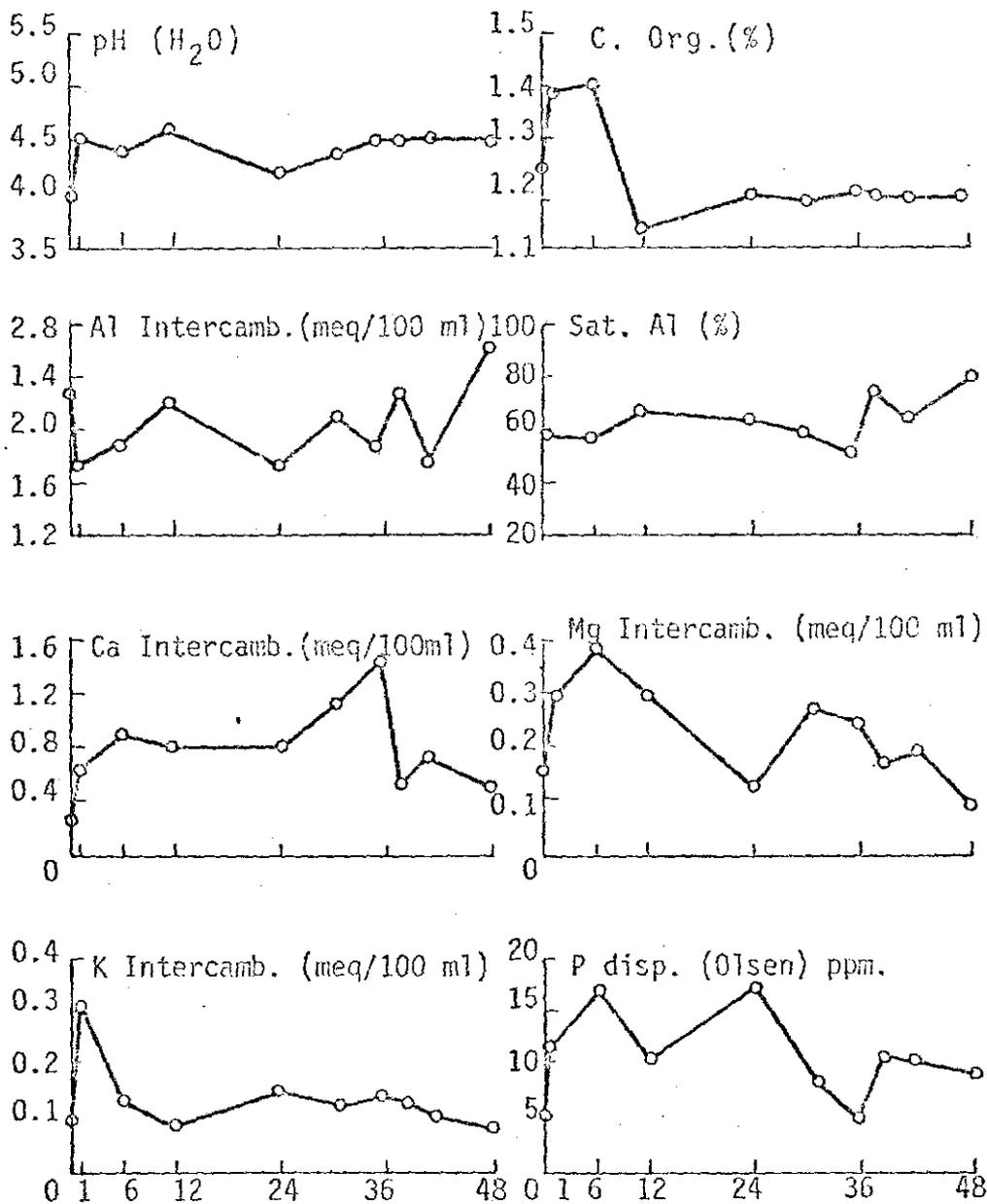


Figura 11. Efectos del grado de intensidad de la quema sobre la actividad microbial medida por la tasa de composición de la celulosa en función del tiempo después de la quema de un bosque en un Ultisol del sud de Bahía, Brasil.
Fuente : Adaptado de Silva (1978).



MESES DESPUES DE LA APERTURA DEL BOSQUE

Figura 12. Cambios en las propiedades químicas de un Ultisol (0-10 cm) continuamente cultivado con arroz de secano, maíz y soya (8 cultivos) sin fertilización en Yurimaguas (1972-1976). Fuentes : Seubert et al., (1977); Villachica (1978) y Sánchez (1979).

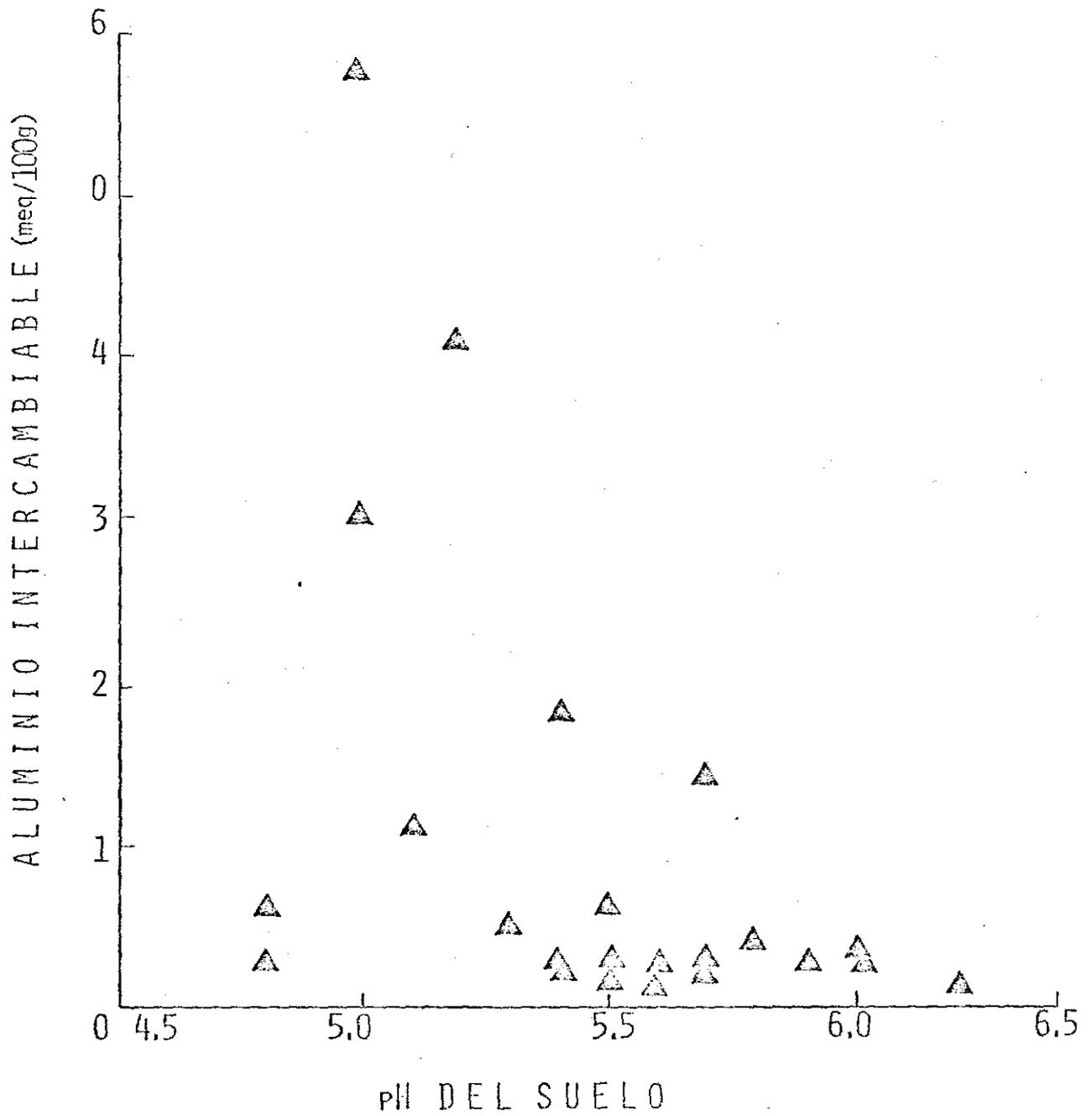
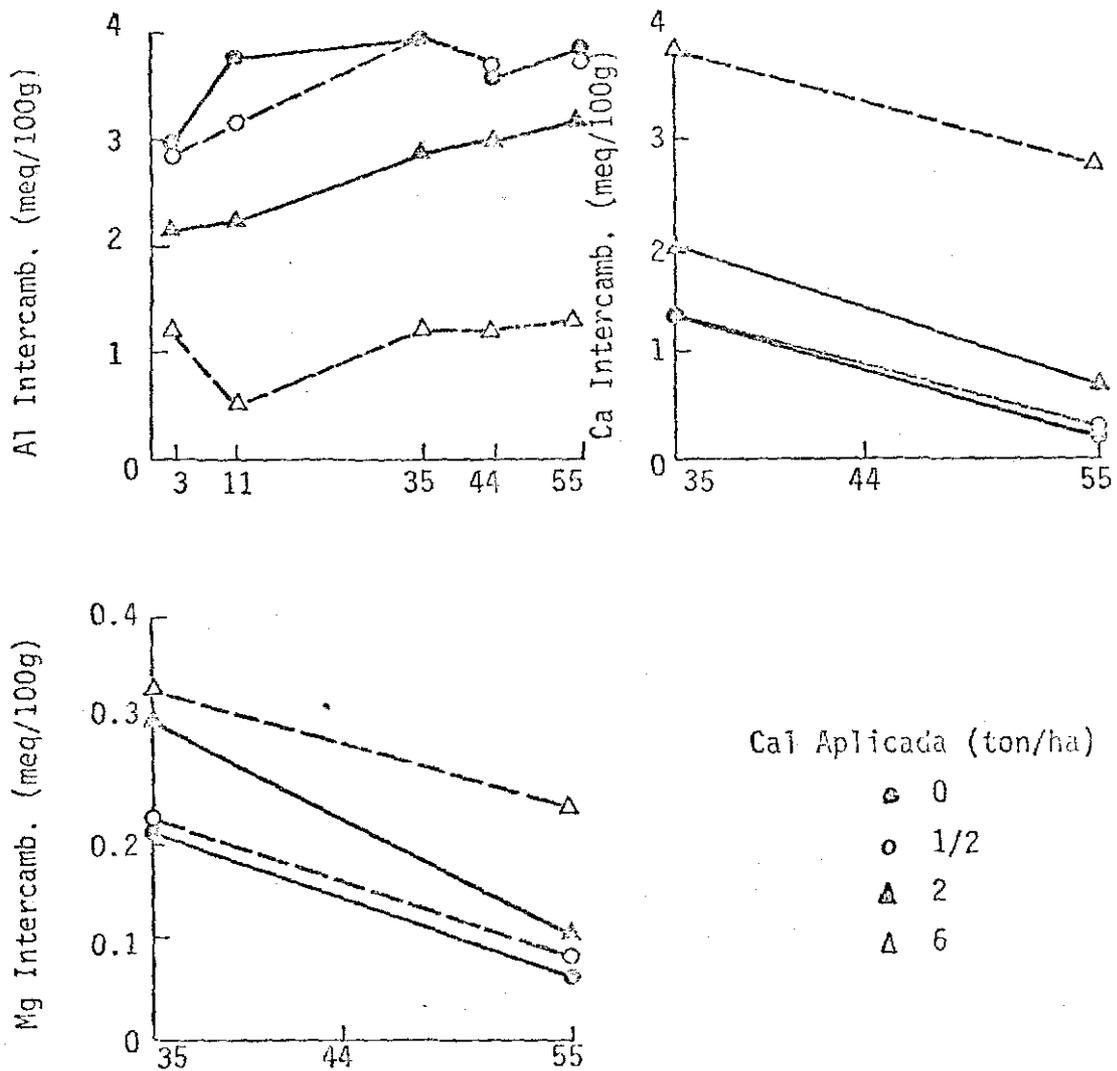


Figura 13. Aluminio intercambiable a diferentes valores de pH del suelo en nueve Oxisoles y Andepts de Panamá.
Fuente : Méndez (1973).



MESES DESPUES DE APLICAR CAL

Figura 14. Efecto residual del encalado (Ca/Mg=10:1) en un Oxisol de Carimagua, Colombia. Enero 1972-Agosto 1976. Fuente : Gualdrón y Spain (1980).

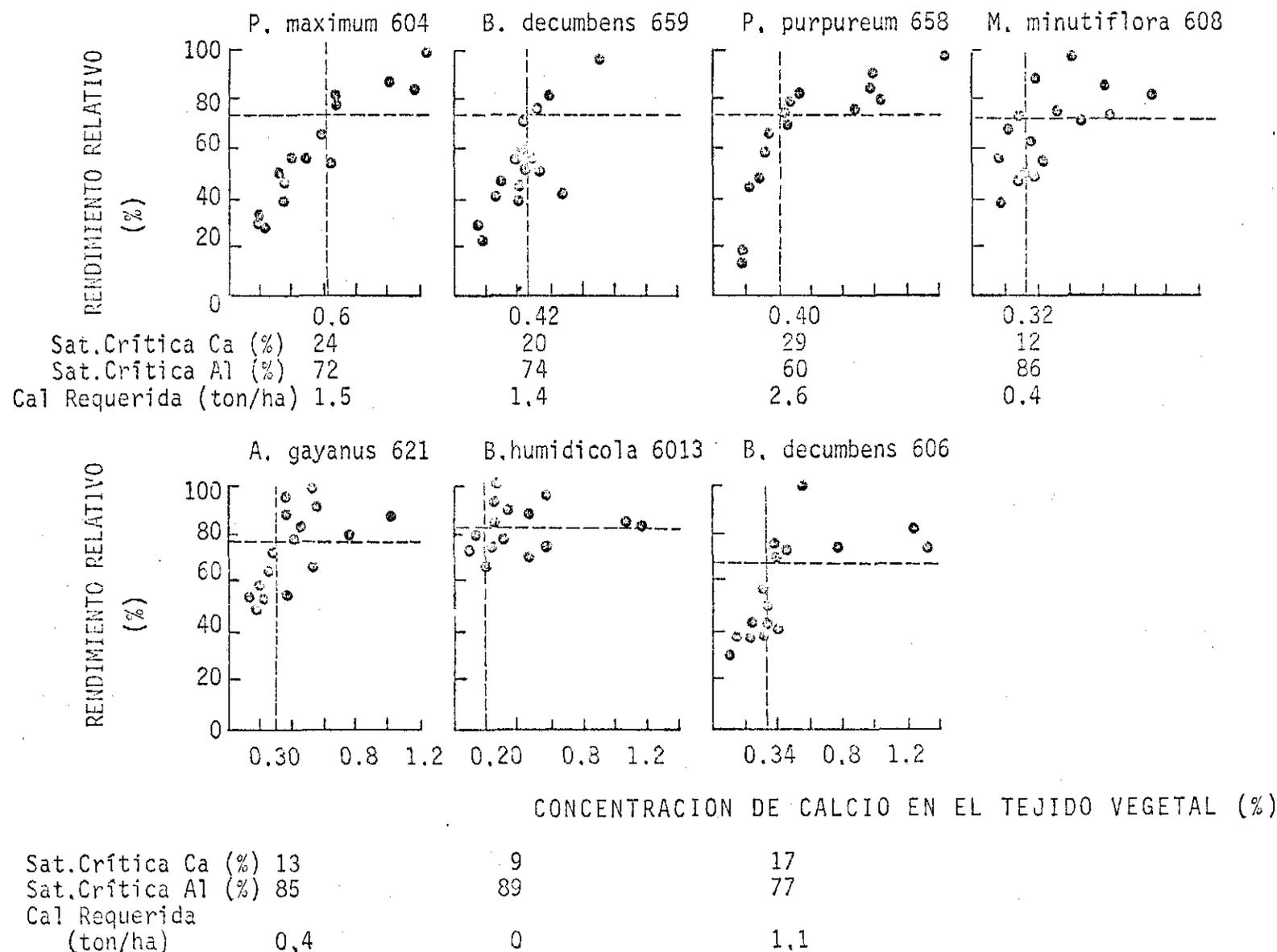


Figura 15. Concentraciones críticas de calcio en el tejido de siete gramíneas forrajeras del trópico establecidas bajo condiciones de campo en un Oxisol de Carimagua, Colombia. Requerimientos de cal obtenidos con la fórmula desarrollada por Cochrane *et al.*, (1980). Fuente : Salinas y Delgadillo (1980).

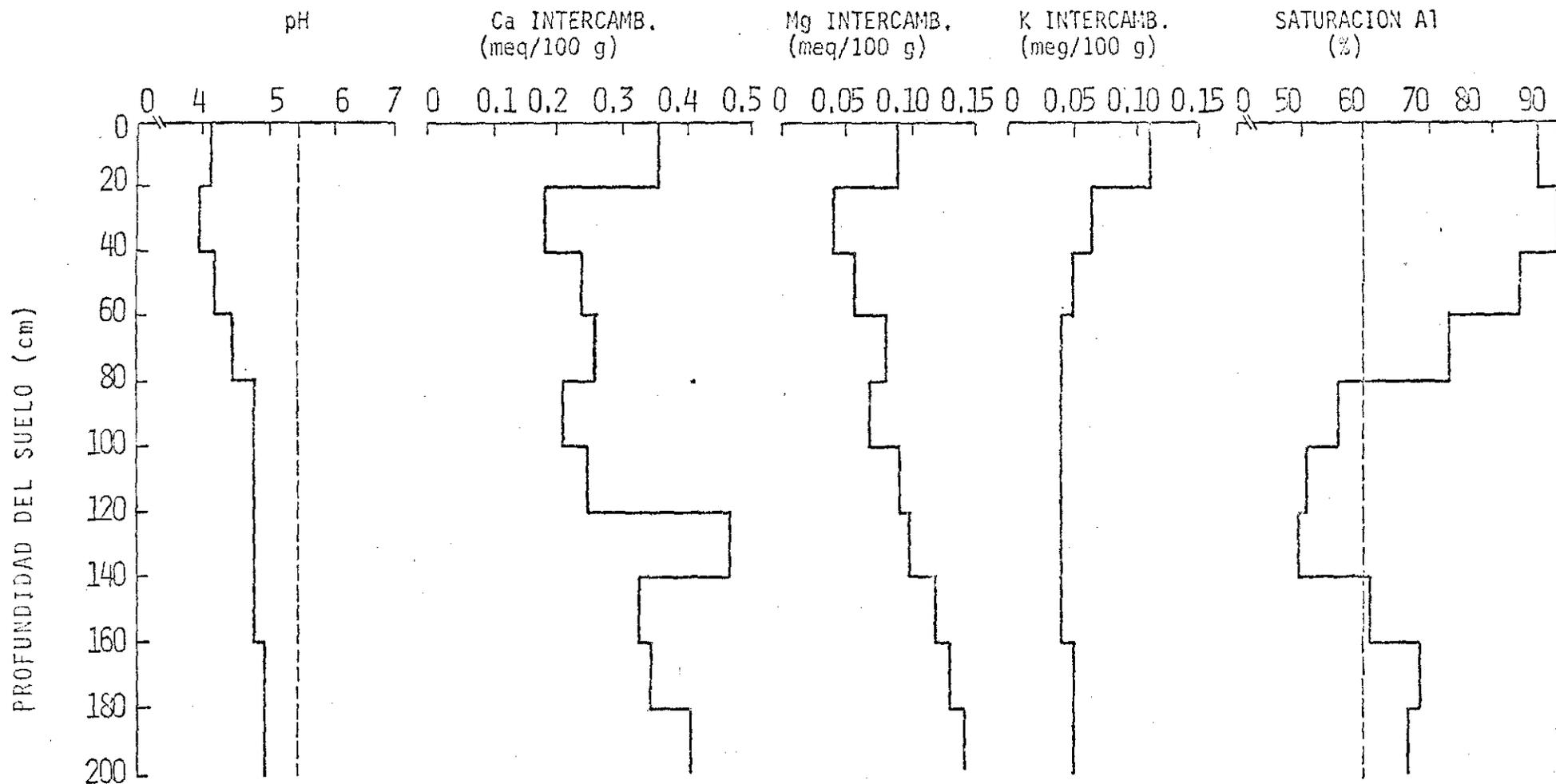


Figura 16. Perfil de acidez de un Oxisol de Carimagua, Colombia.
Fuente : Salinas y Delgadillo (1980).

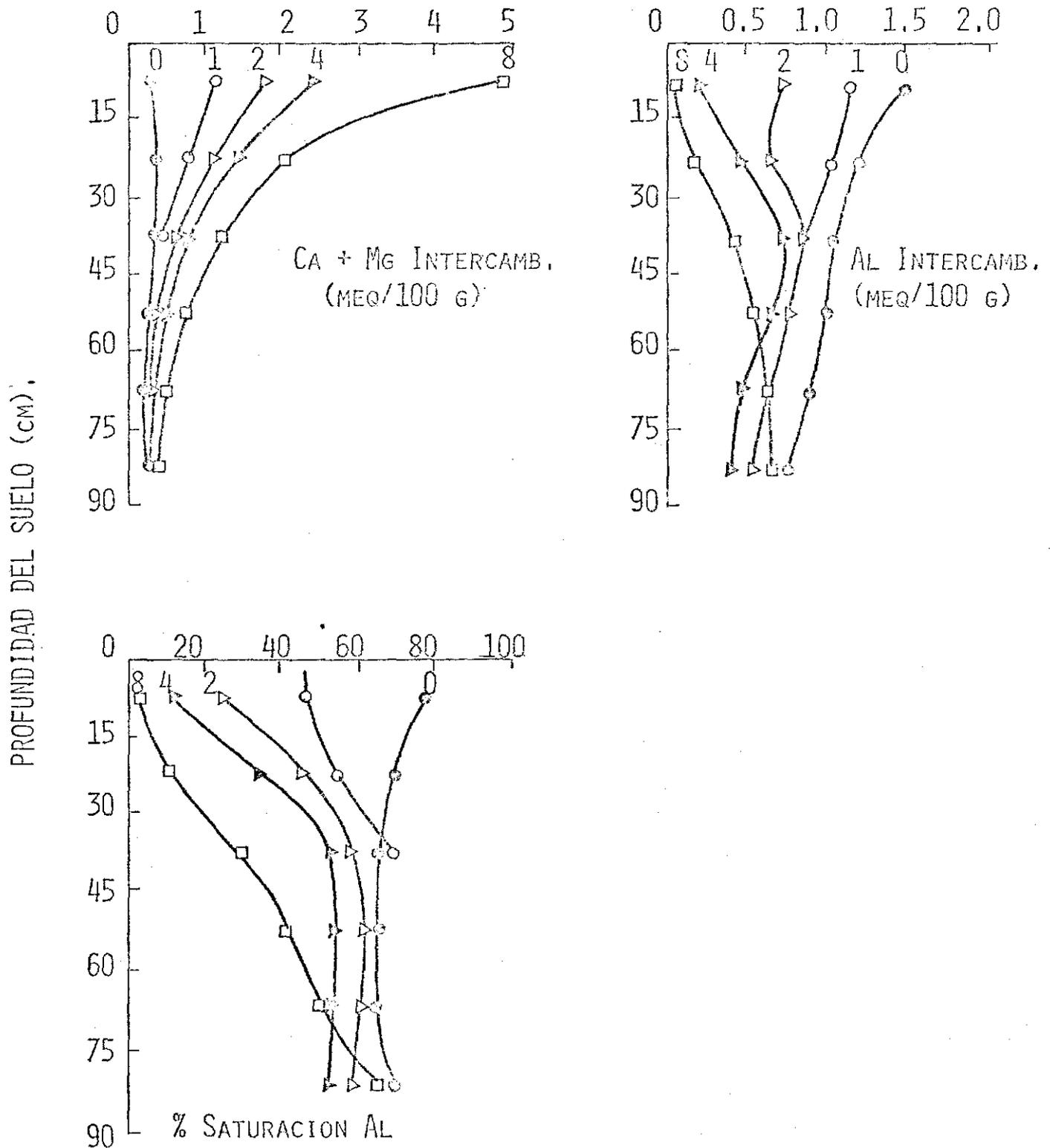


Figura 17. Efectos residuales de la aplicación de cal sobre los cambios de ciertas propiedades químicas en profundidad después de 40 meses de la aplicación de cal a los 15 cm superficiales en un Haplustox Típico de Brasilia, Brasil. Los números encima de cada curva son los niveles de cal en ton/ha. Fuente : NCSU (1976)

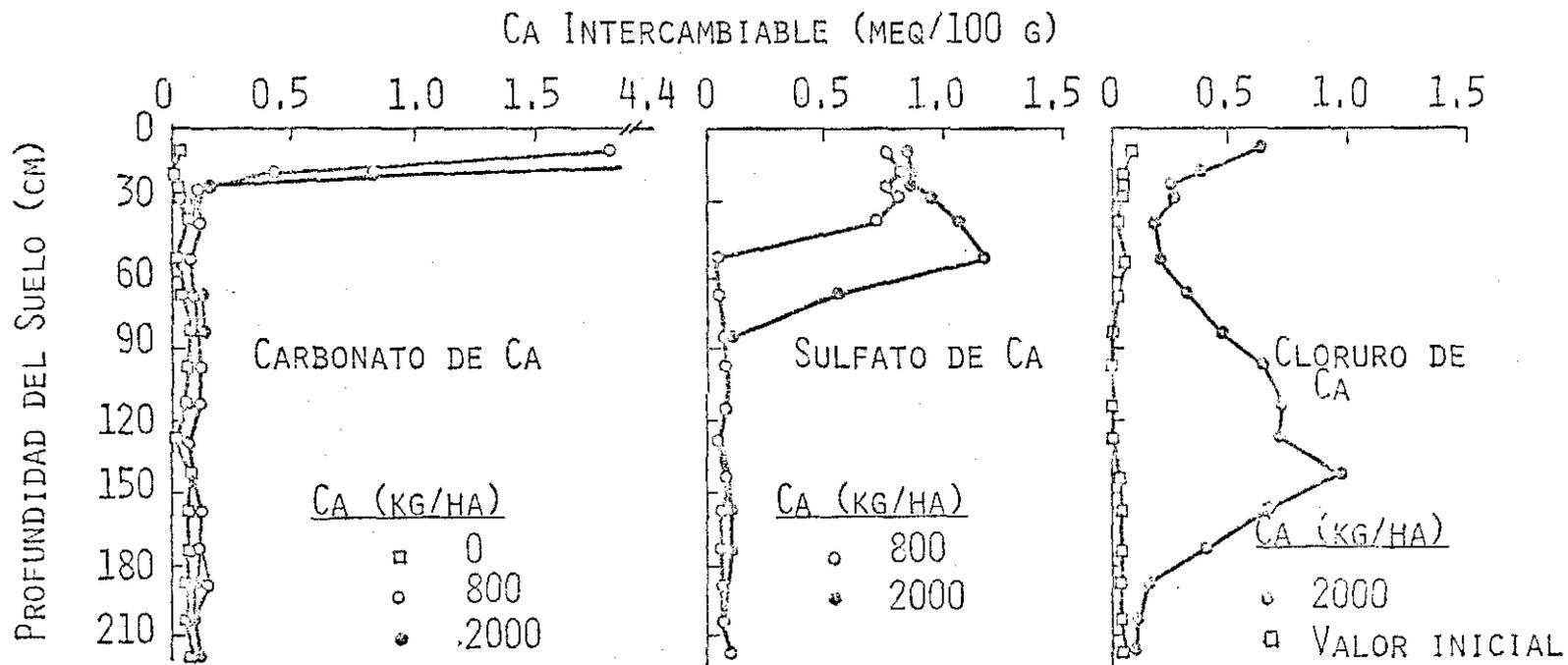


Figura 18. Efectos de varios aniones sobre la distribución del calcio después de su lixiviación con el equivalente de 1200 mm de lluvia en un perfil reconstruido. Calcio como carbonato, sulfato y cloruro fue aplicado en la capa de suelo de 0-15 cm e incubado por 3 semanas antes de iniciar el lixiviado.
Fuente : Ritchey et al., (1980).

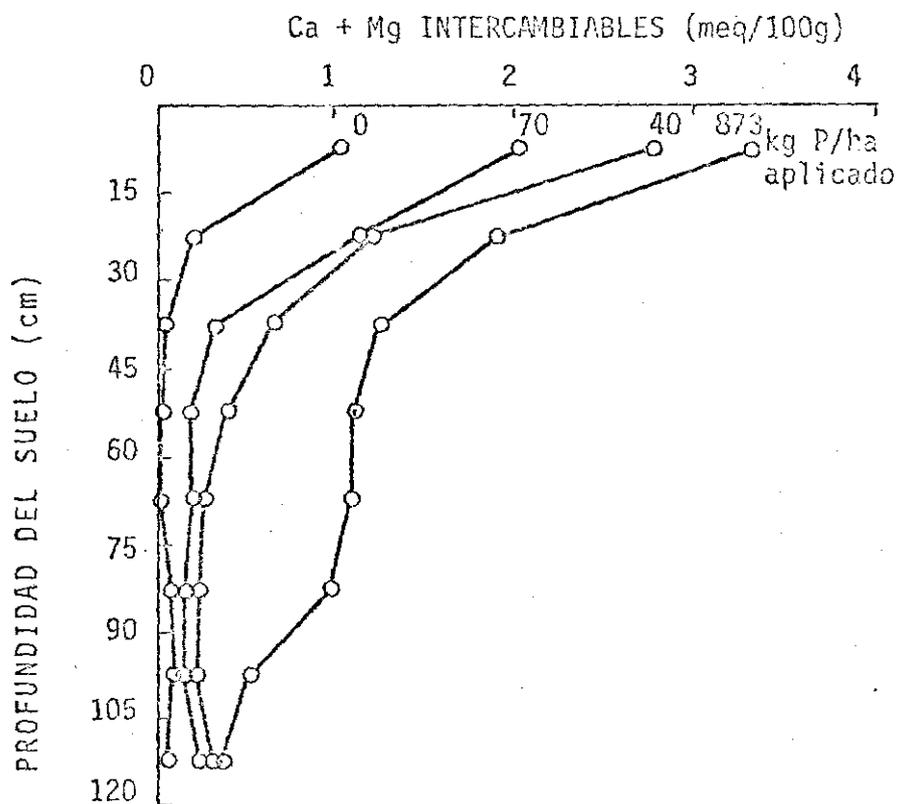


Figura 19. Efectos de varias dosis de superfosfato simple (como kg P/ha) sobre el Ca + Mg intercambiables en el perfil del suelo, medidos cuatro años después de la aplicación de P. Fuente: Ritchey *et al.*, (1980).

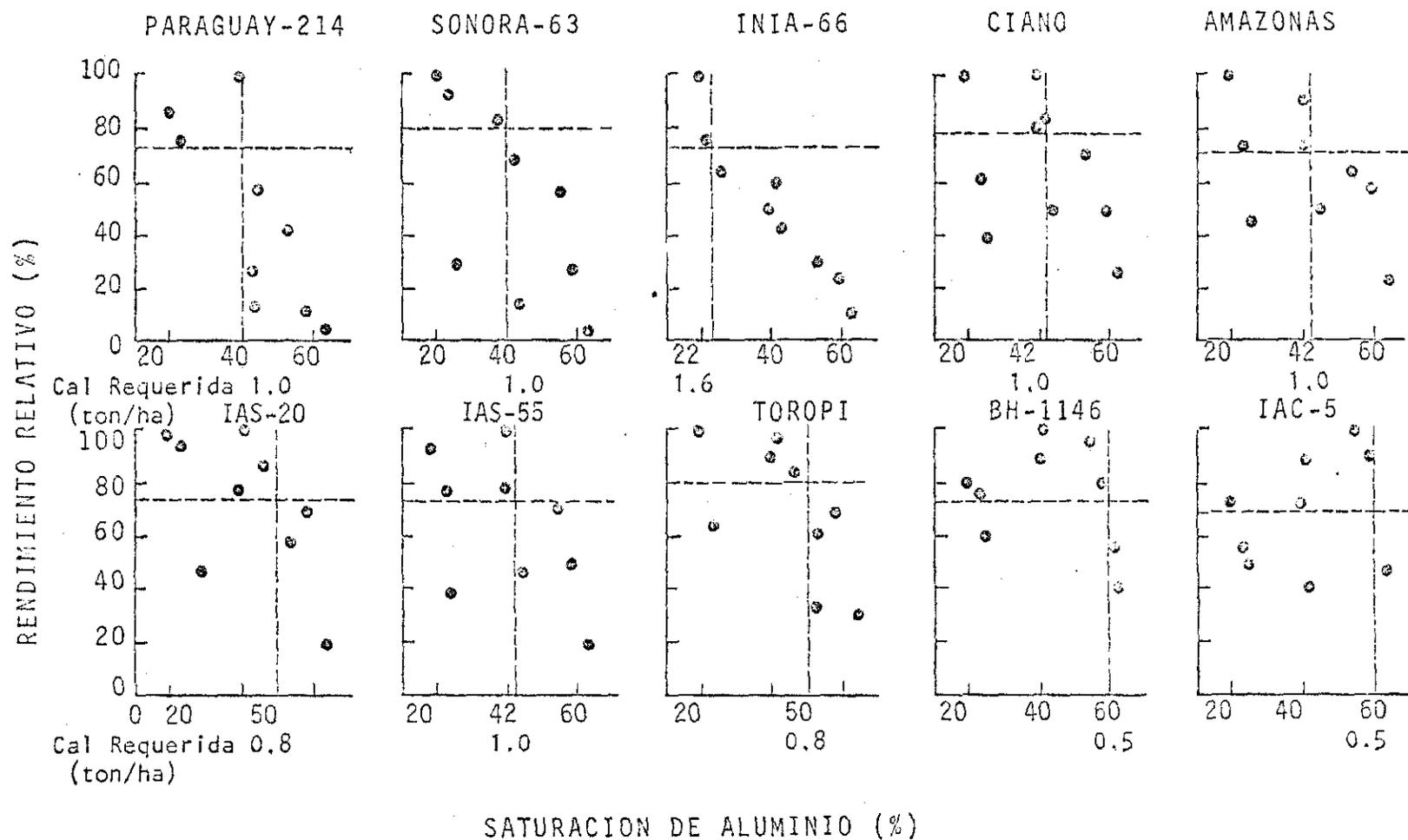


Figura 20. Niveles críticos de saturación de aluminio de 10 variedades de trigo obtenidas en un Oxisol de Brasilia, Brasil. La cal requerida se obtuvo con la fórmula de Cochrane *et al.*, (1980).
Fuente : Adaptado de Salinas (1978).

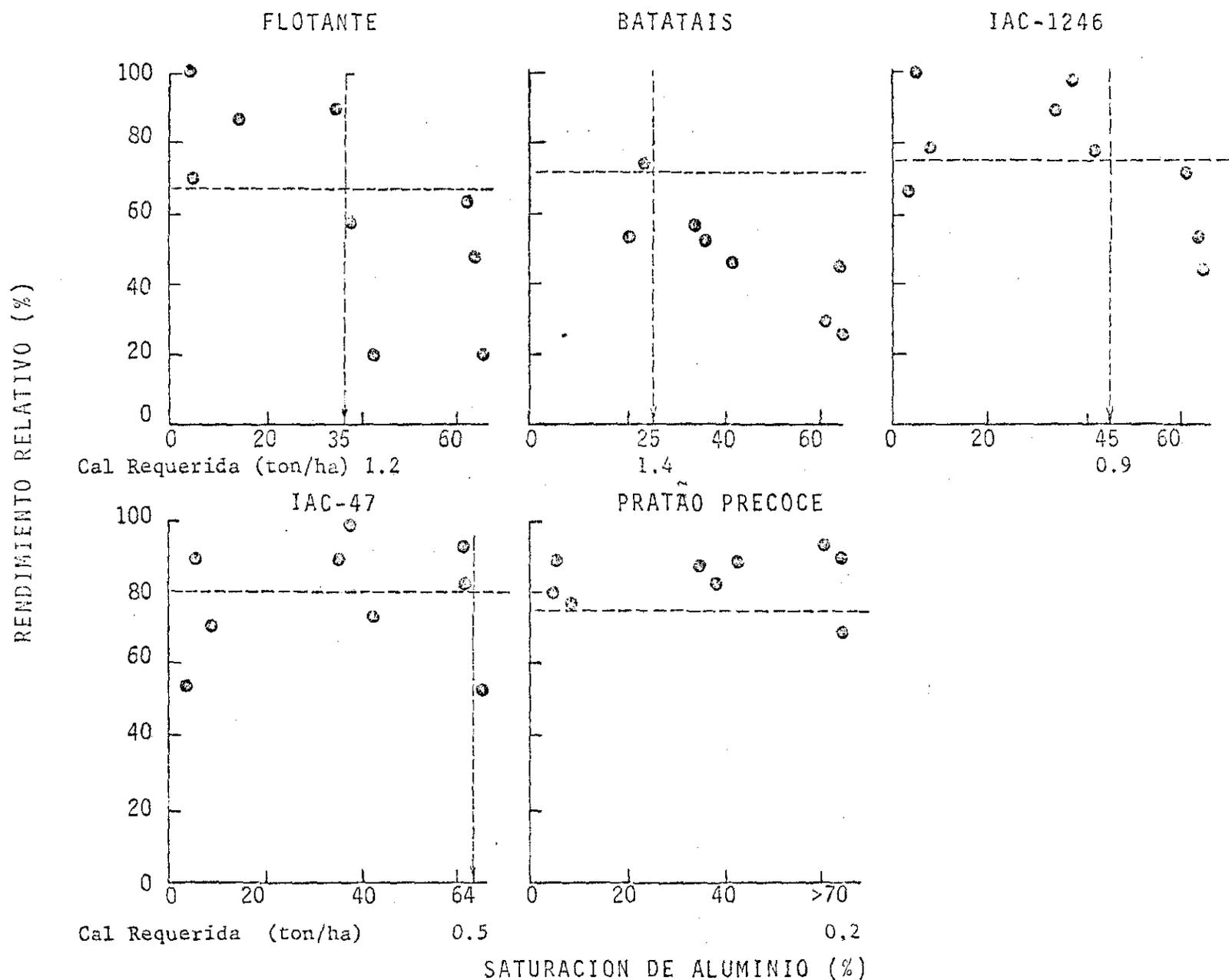


Figura 21. Niveles críticos de saturación de aluminio de cinco variedades de arroz cultivadas en un Oxisol de Brasilia, Brasil. Cal requerida obtenida con la fórmula de Cochrane *et al.*, (1980) Fuente : Adaptado de Salinas (1978).

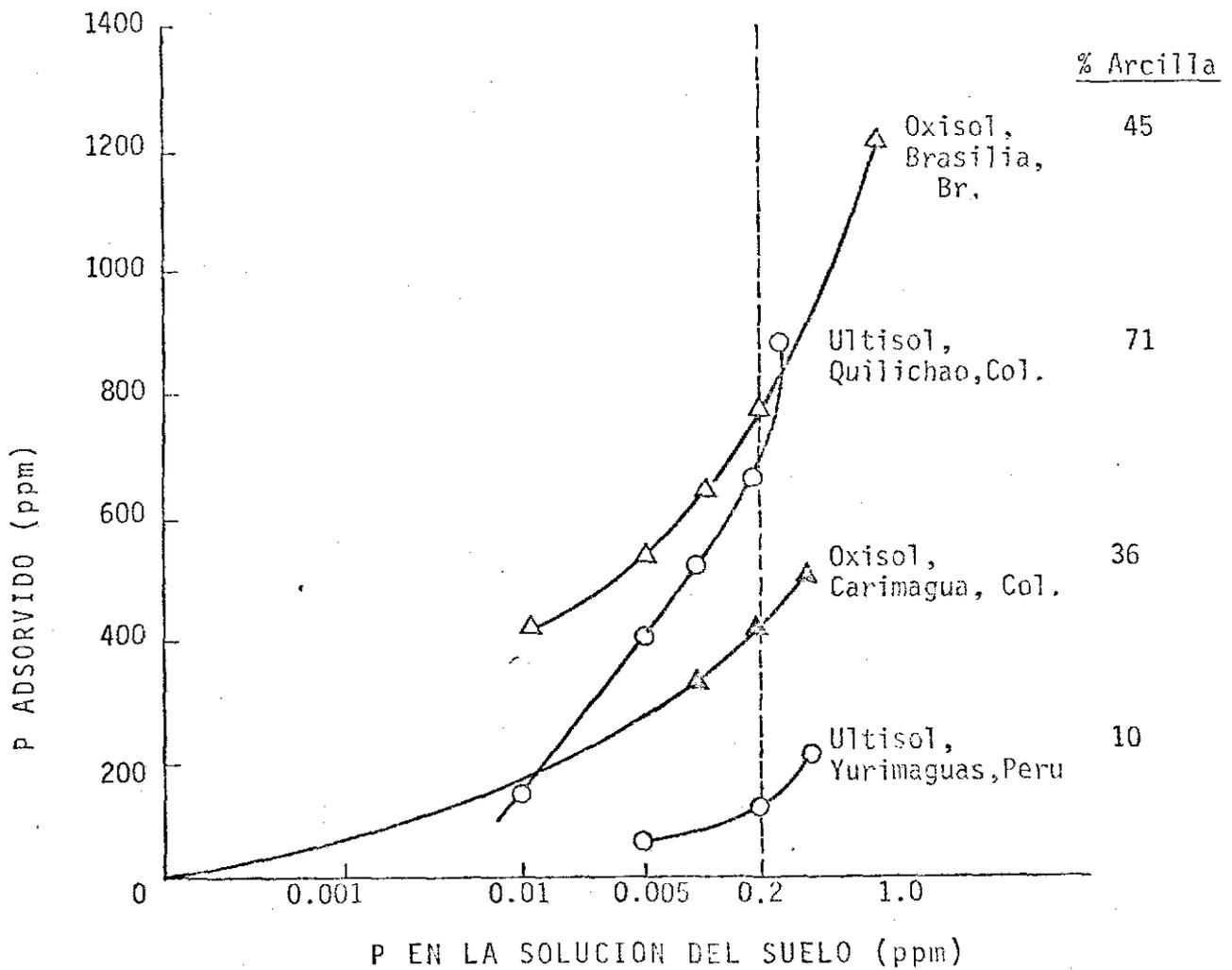


Figura 22. Ejemplos de isothermas de adsorción de fósforo en algunos suelos de Centros de Investigación en América Tropical. Fuentes : Sánchez (1975); CIAT (1978), Sánchez and Isbell (1979).

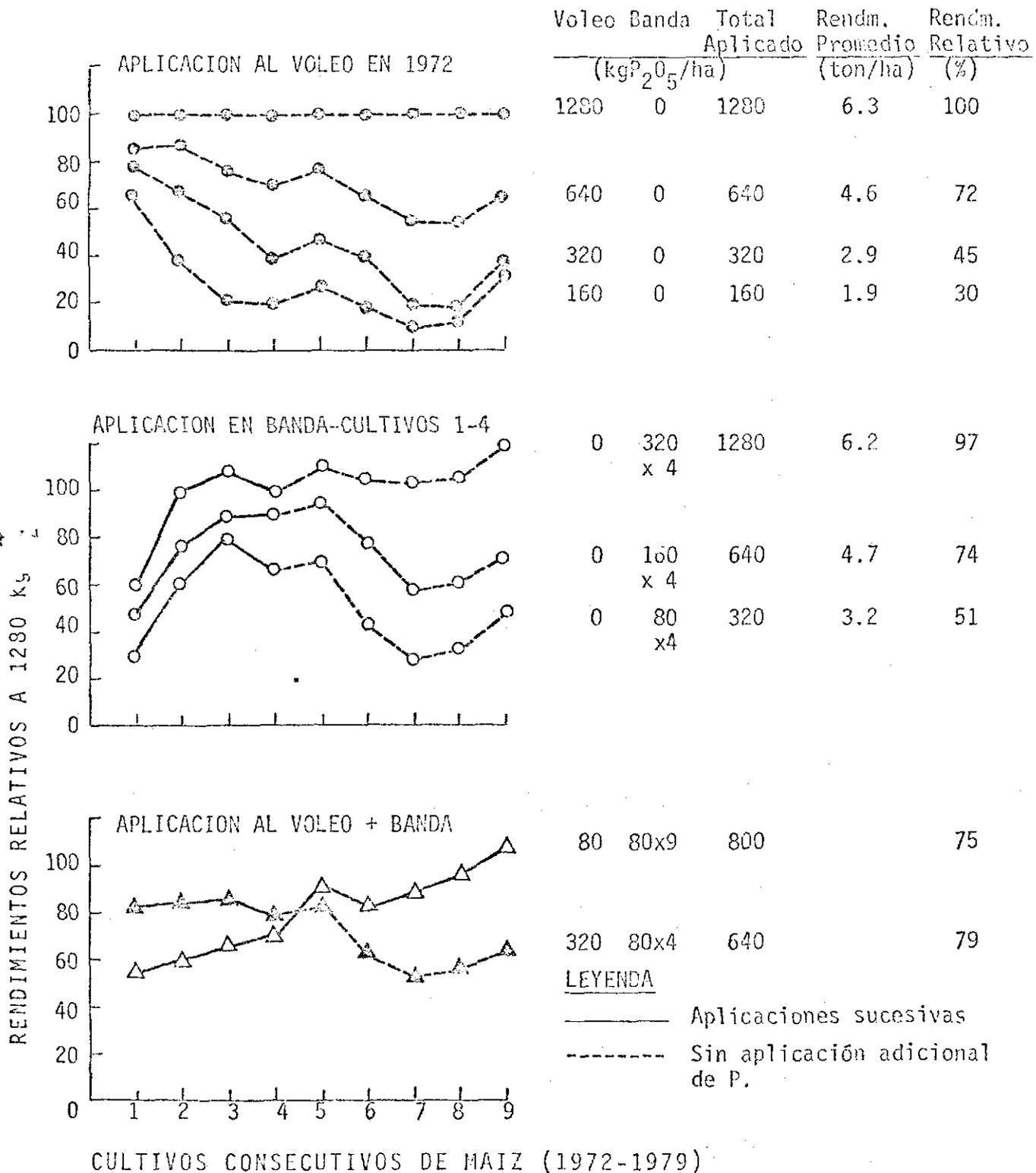


Figura 23. Efectos residuales de diferentes dosis y métodos de aplicación de superfosfato sobre los rendimientos de nueve cultivos consecutivos de maíz en un Haplustox típico de Brasilia, Brasil.
Fuentes : NCSU (1975, 1976, 1980), CPAC (1979, 1980), Yost et al., (1979).

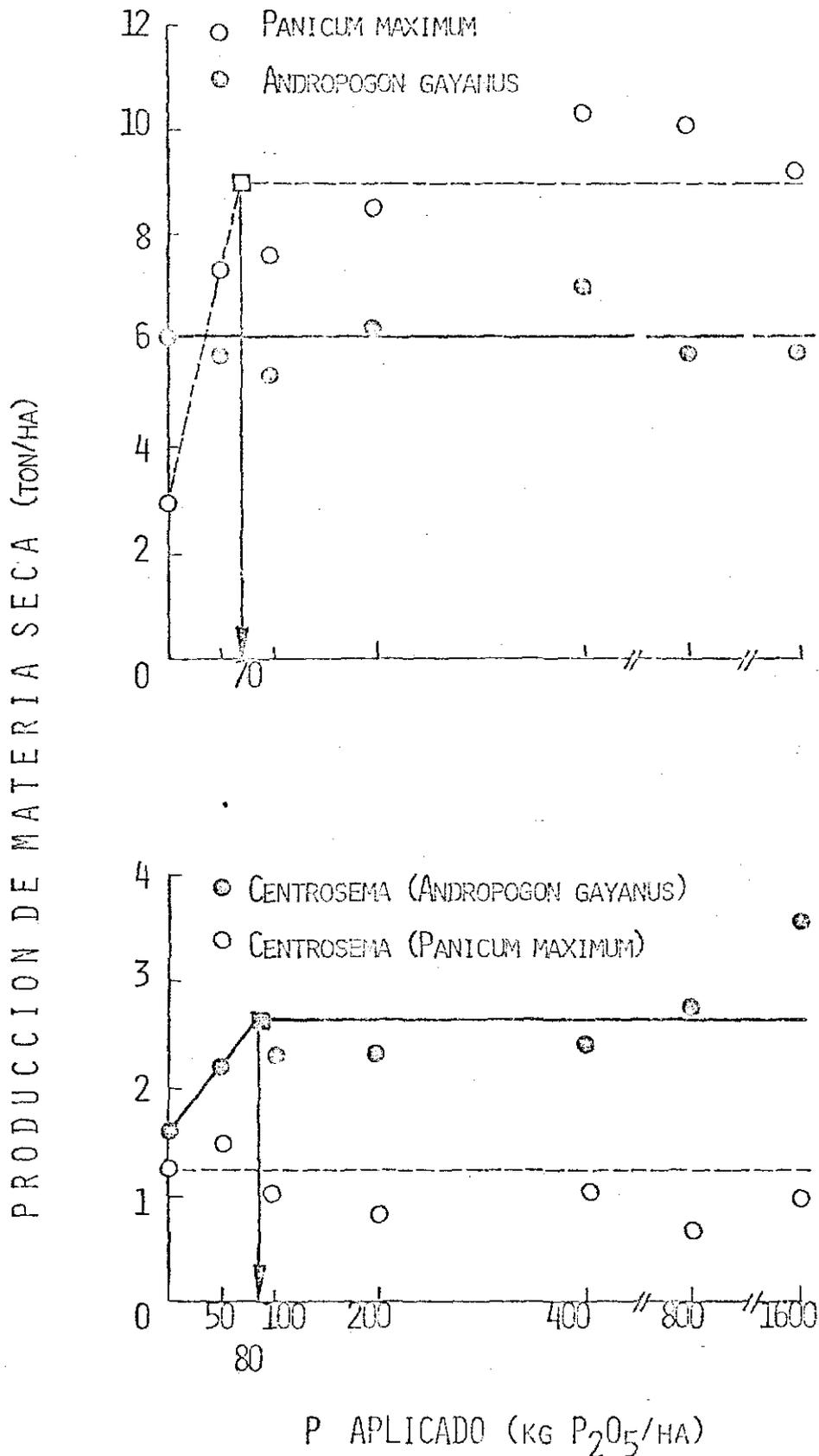


Figura 24. Respuesta de las asociaciones de *Panicum maximum* y *Andropogon gayanus* con *Centrosema* híbrido a las aplicaciones de fósforo durante el año de establecimiento en un Ultisol de Quilichao, Colombia.

Fuente : CIAT (1979).

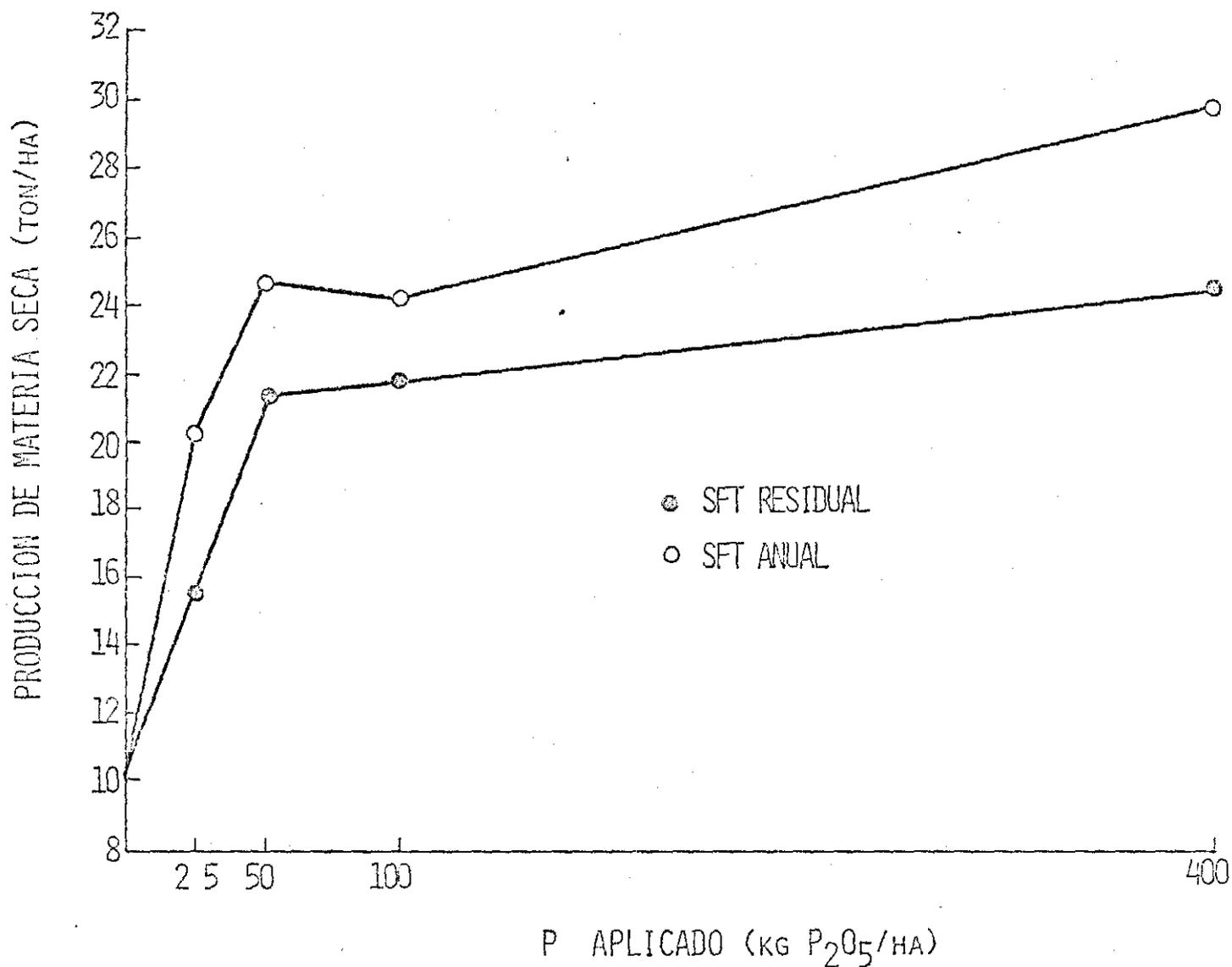


Figura 25. Respuesta de *Brachiaria decumbens* a las aplicaciones de fósforo en un Oxisol de Carimagua, Colombia (suma de 8 cortes). En el tratamiento anual fué reaplicado el fósforo un año después de la siembra.
Fuente : CIAT (1978).



Figura 26. Depósitos principales de rocas fosfóricas en Suramérica tropical.
Fuentes : Fenster and León (1979ab) e información actualizada.

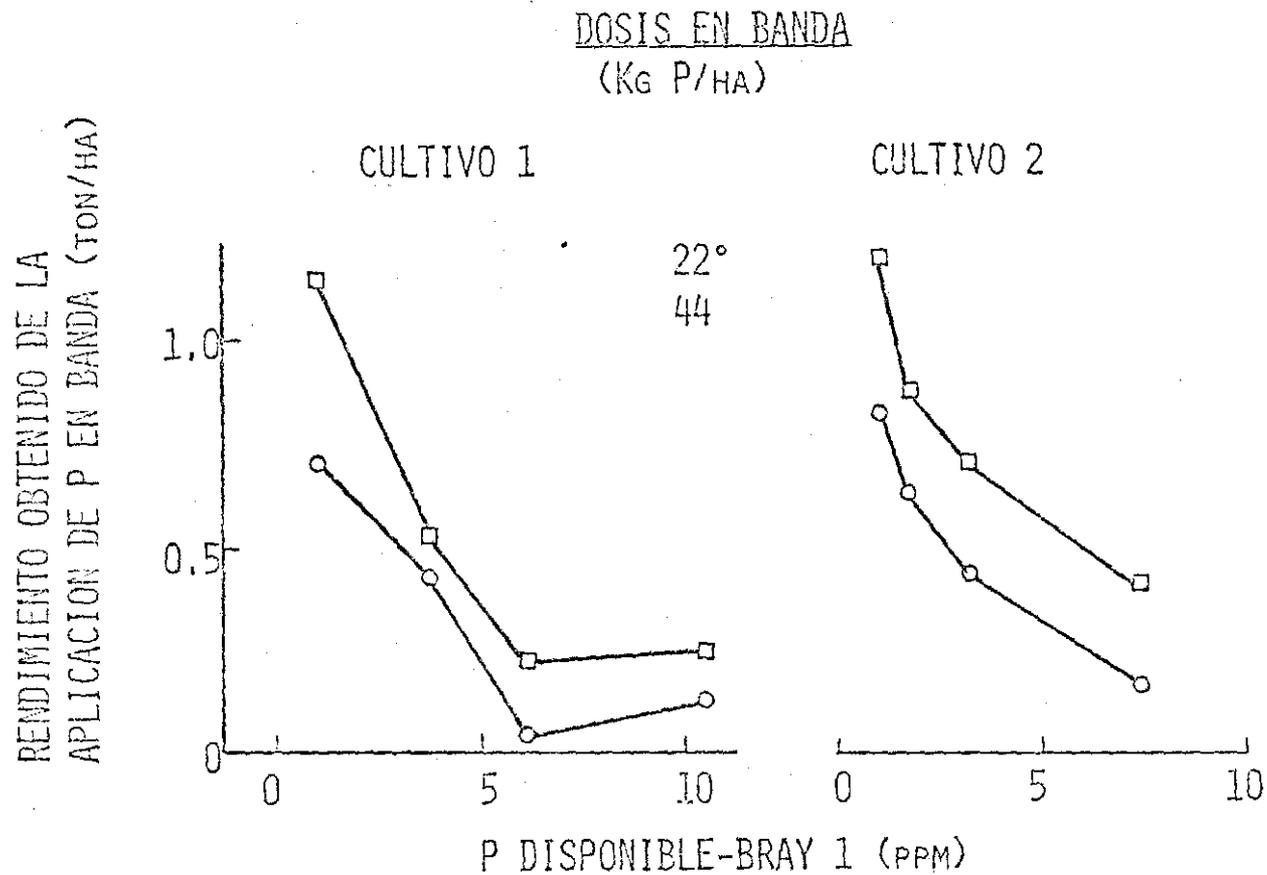


Figura 27. Relación entre el rendimiento en grano de 2 cultivos consecutivos de soya obtenidos con la aplicación en banda de superfosfato y el nivel de fósforo disponible en un Acrustox típico de Brasilia, Brasil.
Fuente : Smyth (1981).

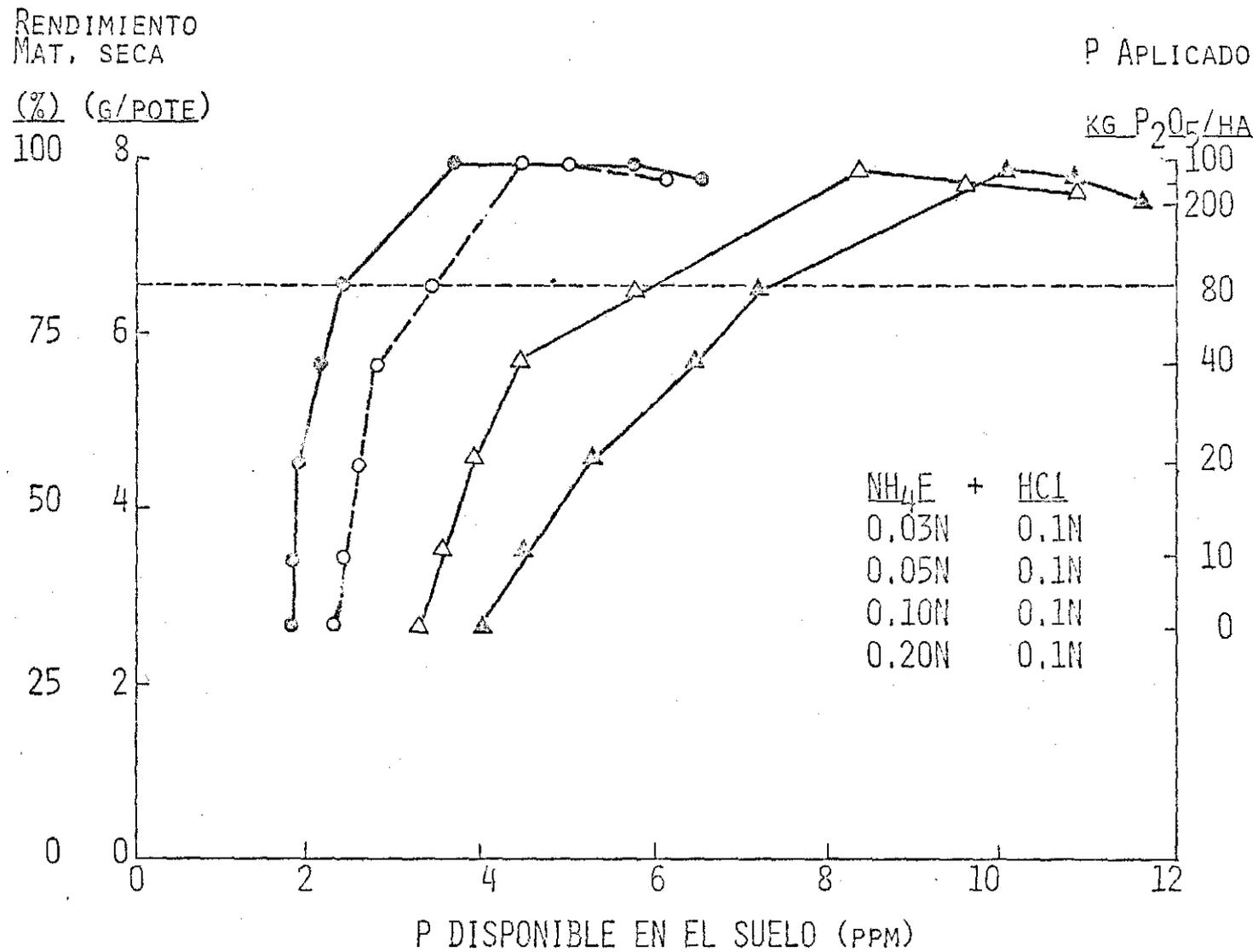


Figura 28. Producción de materia seca de *Brachiaria decumbens* en un Oxisol de Carimagua, Colombia en función de niveles de fósforo disponible obtenidos por diferentes soluciones extractantes.
Fuente : CIAT (1981).

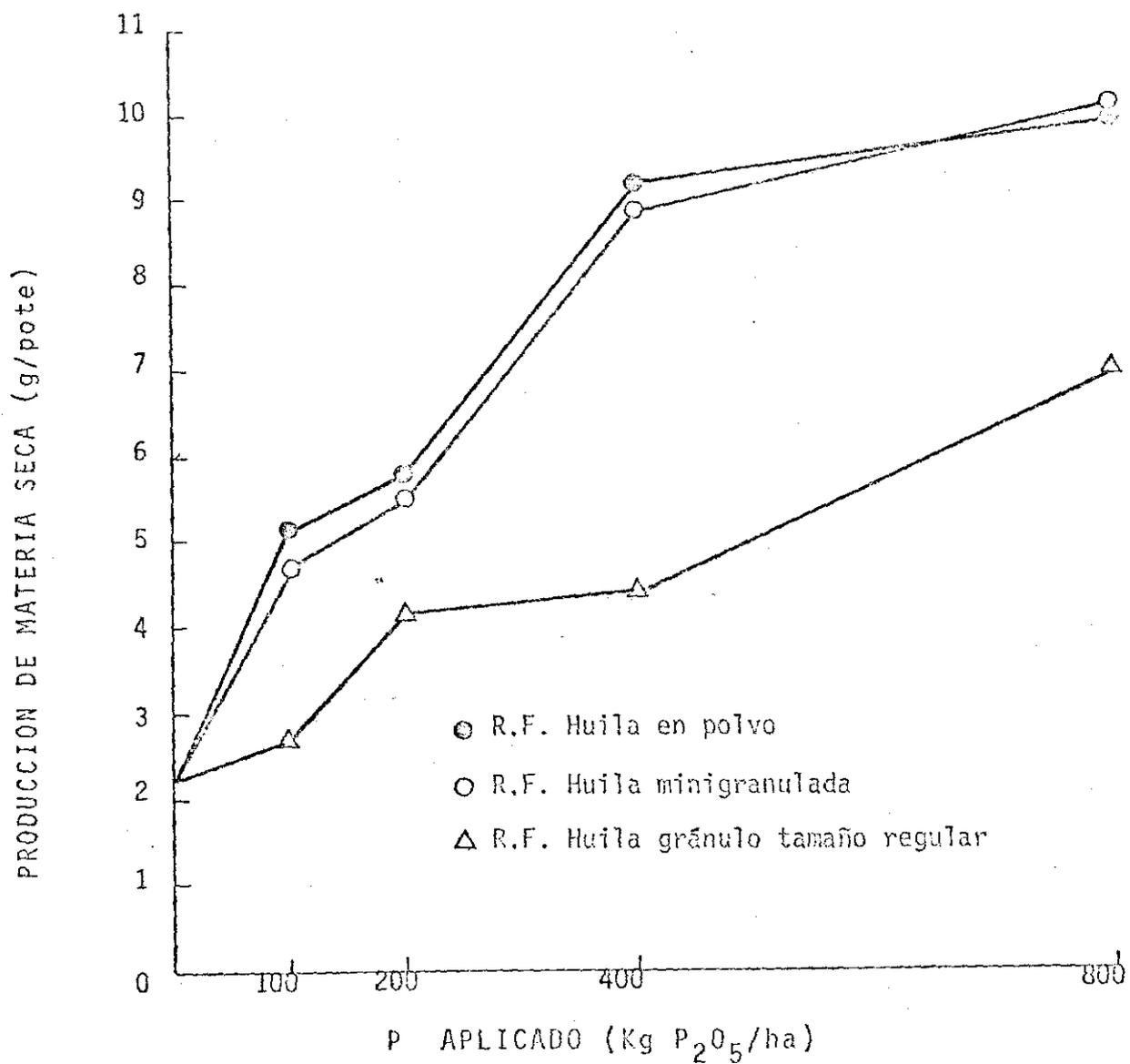


Figura 29. Efectos de la dosis y tamaño de gránulo de la roca fosfórica Huila sobre la producción de materia seca de Panicum maximum obtenida con un Oxisol de Carimagua, Colombia en el invernadero. (suma de 2 cortes)
Fuente : CIAT (1980, 1981).

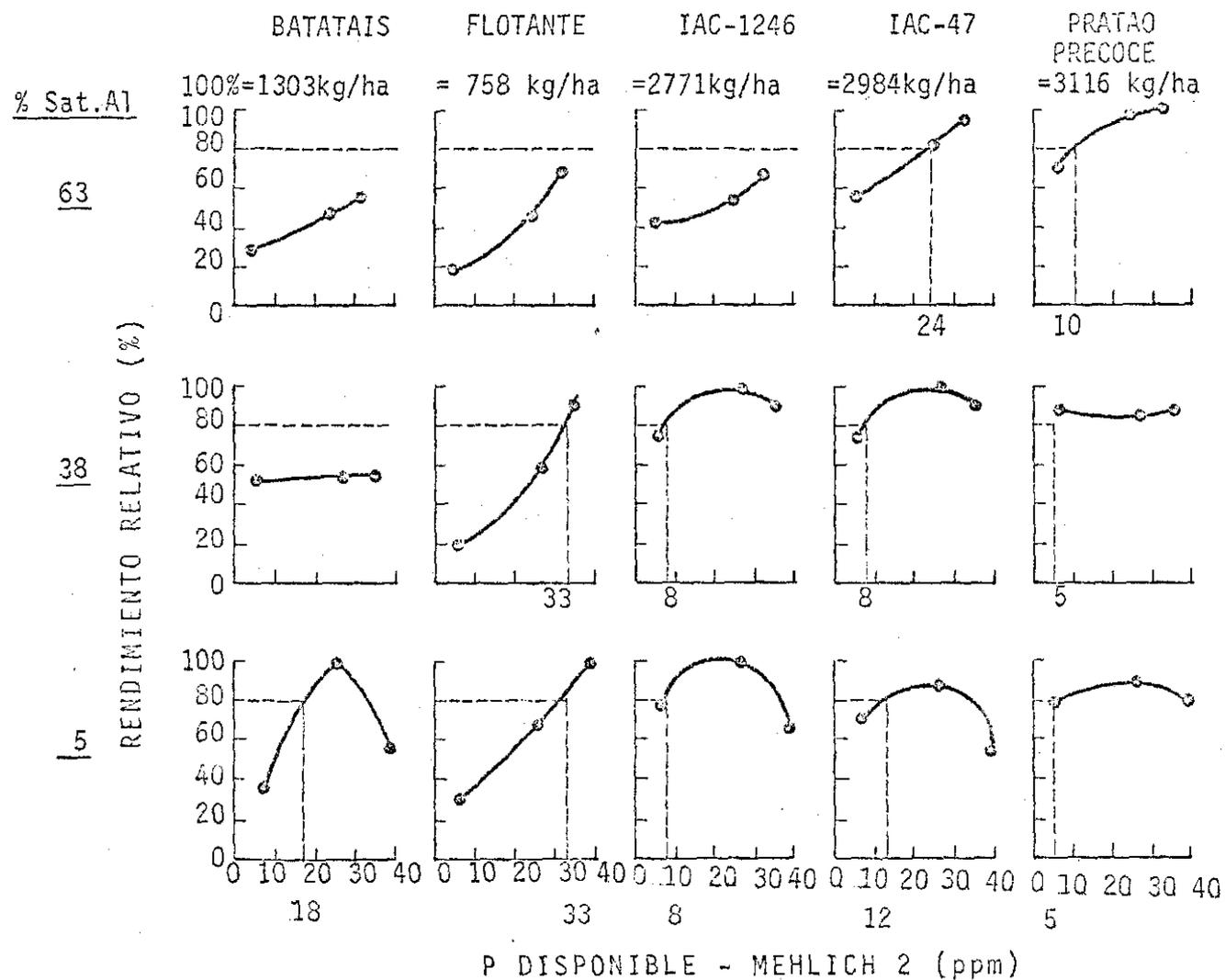


Figura 30. Rendimientos relativos de cinco variedades de arroz (porcentaje del rendimiento máximo de cada variedad) en función del P disponible en el suelo bajo tres niveles de estres de Al en un Oxisol de Brasilia, Brasil.
Fuente : Salinas (1978).

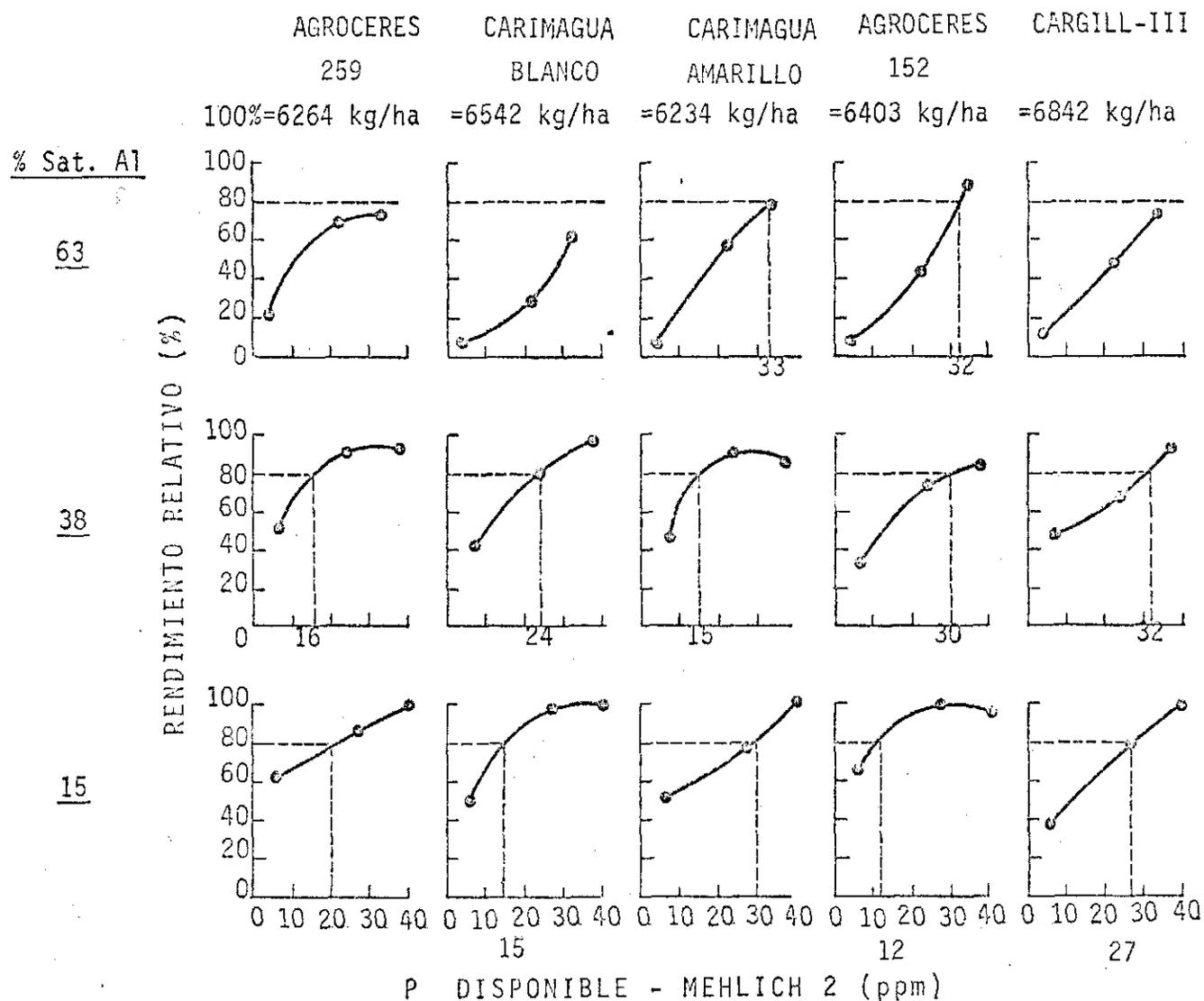


Figura 31. Rendimientos relativos de cinco variedades de maíz (porcentaje del rendimiento máximo de cada variedad) en función del P disponible en el suelo bajo tres niveles de estrés de Al en un Oxisol de la sabana brasilera. Fuente : Salinas (1978).

% Sat. A1

59

32

5

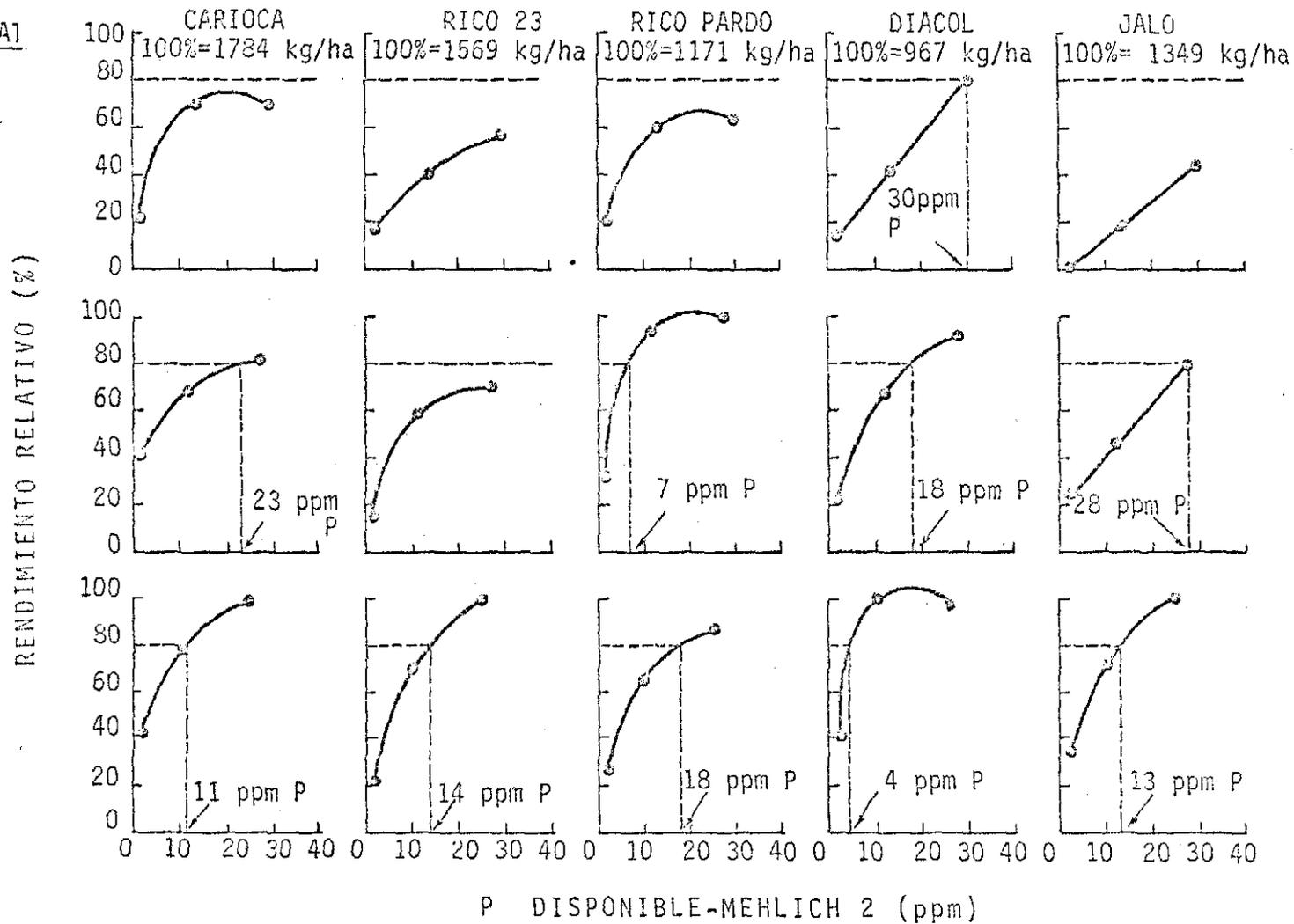


Figura 32. Rendimientos relativos de cinco variedades de frijol (porcentaje del máximo rendimiento de cada variedad) en función del P disponible en el suelo bajo tres niveles de estres de Al en un Oxisol de Brasilia, Brasil. Fuente : Miranda y Lobato (1978).

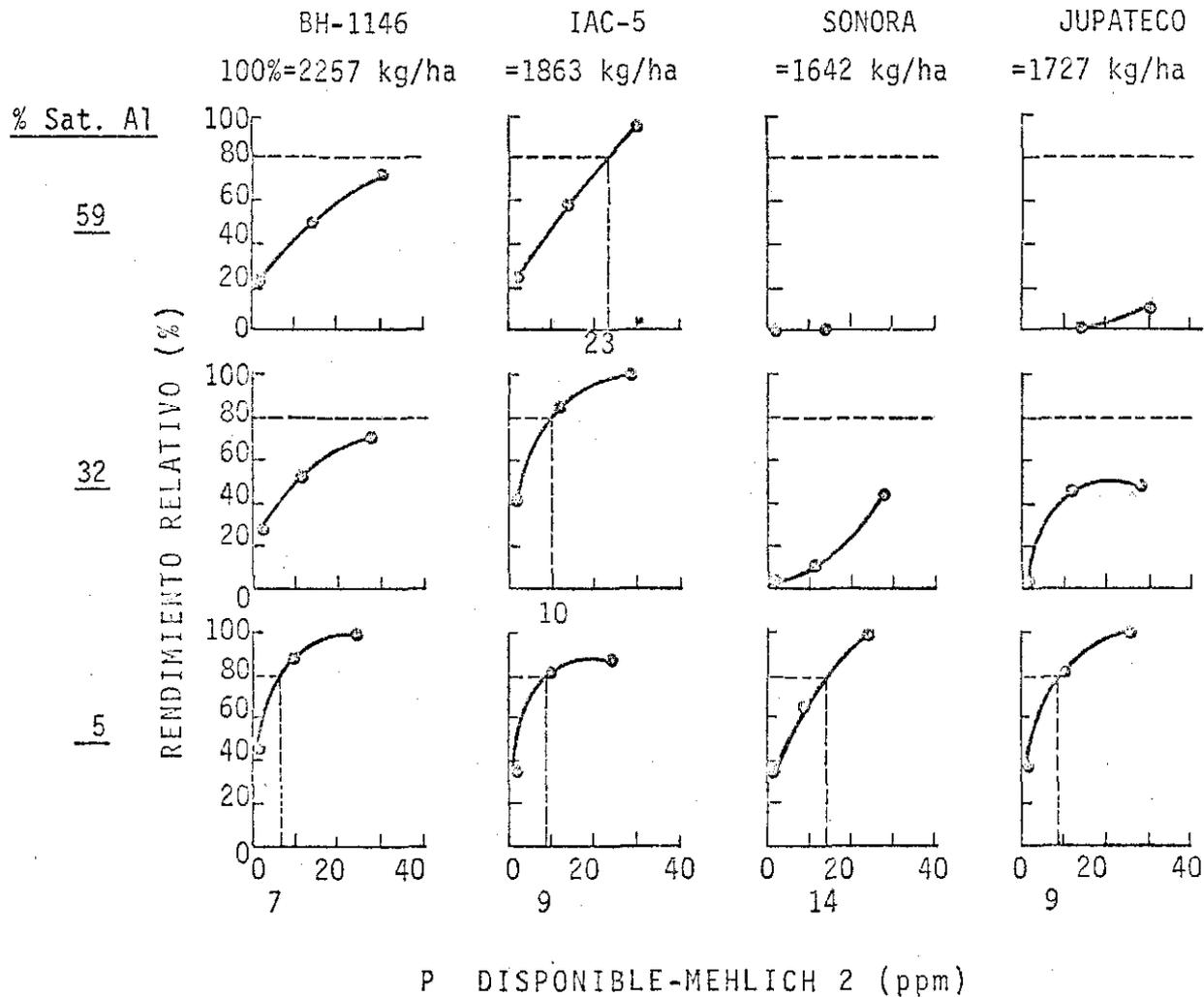


Figura 33. Rendimientos relativos de variedades de trigo en función de niveles del P disponible en el suelo y niveles de saturación de aluminio en un Haplustox típico de Brasilia, Brasil.
Fuente : Miranda y Lobato (1978).

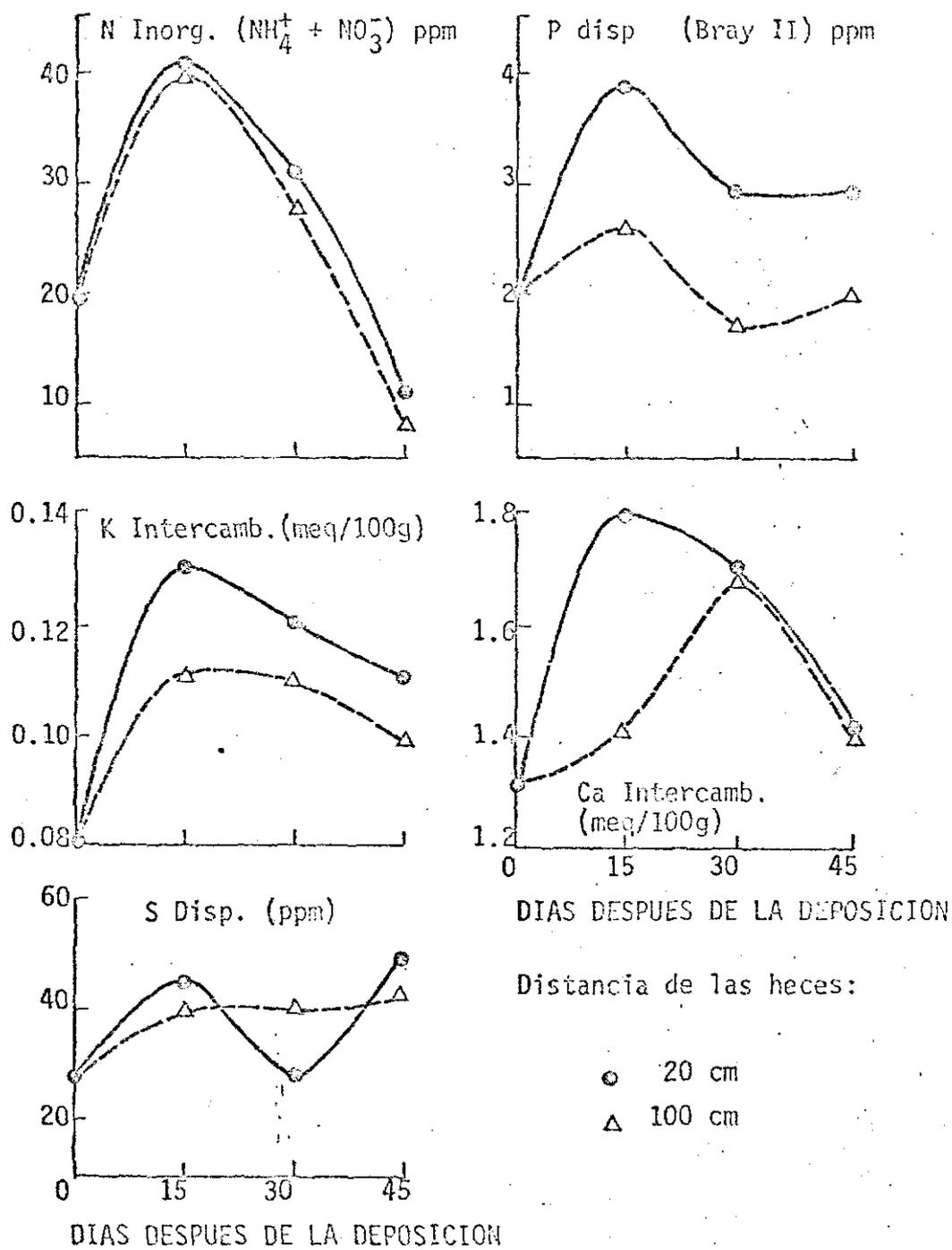


Figura 34. Reciclaje de nutrimentos en la capa superficial (0-20cm) de un Orthoxic Palehumult de Quilichao, Colombia, como resultado de la deposición de heces del ganado pastoreado *Brachiaria decumbens*.
Fuente : Salinas y Campos (sin publicar)

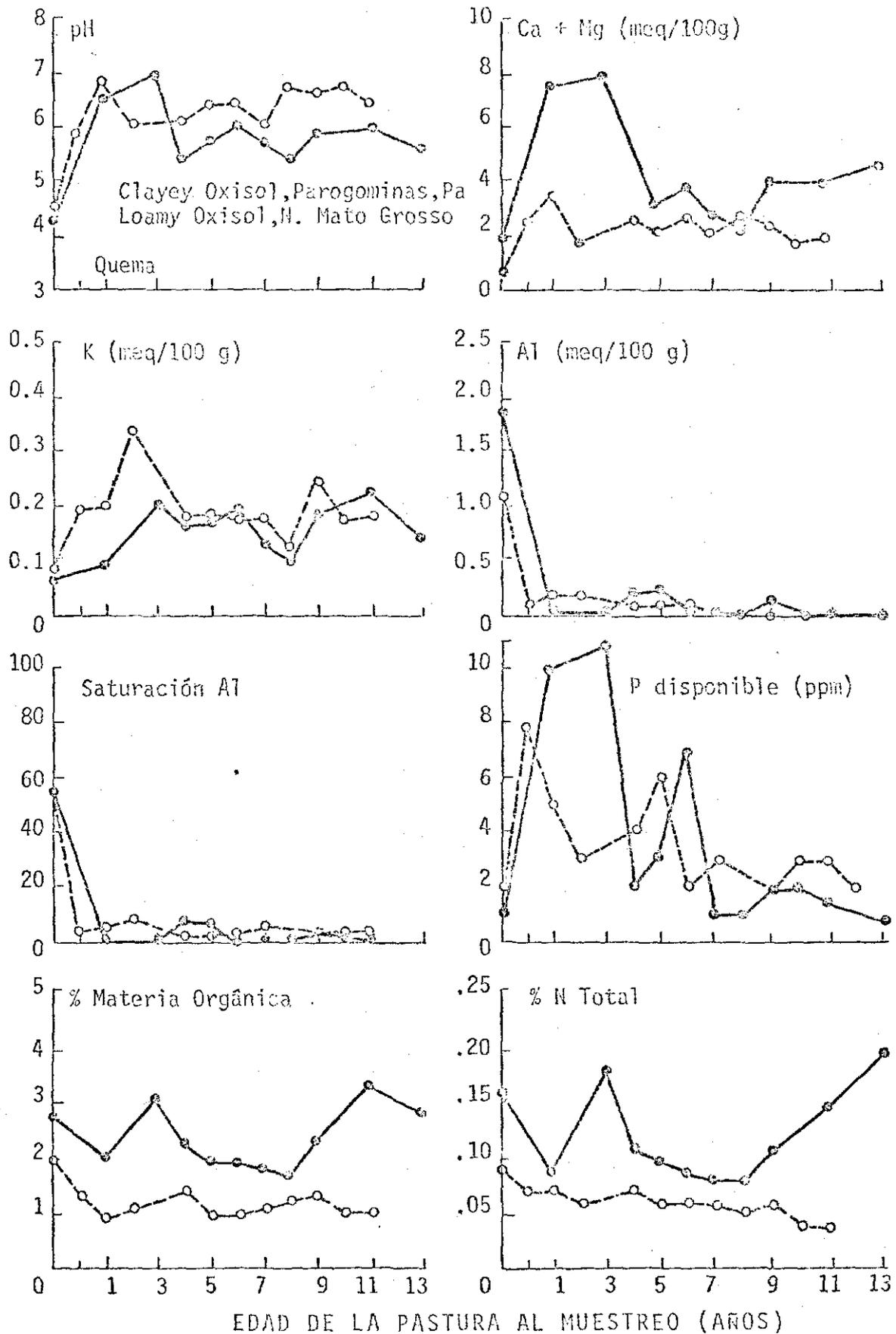


Figura 35. Cambios en las propiedades químicas de la capa superficial del suelo en praderas de *Panicum maximum* de edad conocida y muestreadas al mismo tiempo en dos regiones de la amazonía oriental de Brasil. Fuente : Adaptado de Serrão et al., (1979).